



TESIS - TM 142501

**OPTIMASI MULTI RESPON MENGGUNAKAN
METODE TAGUCHI GREY-FUZZY PADA PROSES
END MILLING MATERIAL ASSAB XW-42 DENGAN
PENDINGINAN NITROGEN CAIR**

Dian Ridlo Pamuji
NRP 2113201009

Dosen Pembimbing
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



TESIS - TM 142501

OPTIMIZATION OF MULTI RESPONSE USING TAGUCHI GREY-FUZZY END MILLING PROCESS MATERIAL ASSAB XW-42 WITH COOLING LIQUID NITROGEN

Dian Ridlo Pamuji
NRP 2113201009

Advisor
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

MASTER PROGRAM
FIELD STUDY OF ENGINEERING AND MANUFACTURING SYSTEM
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2015

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di**

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

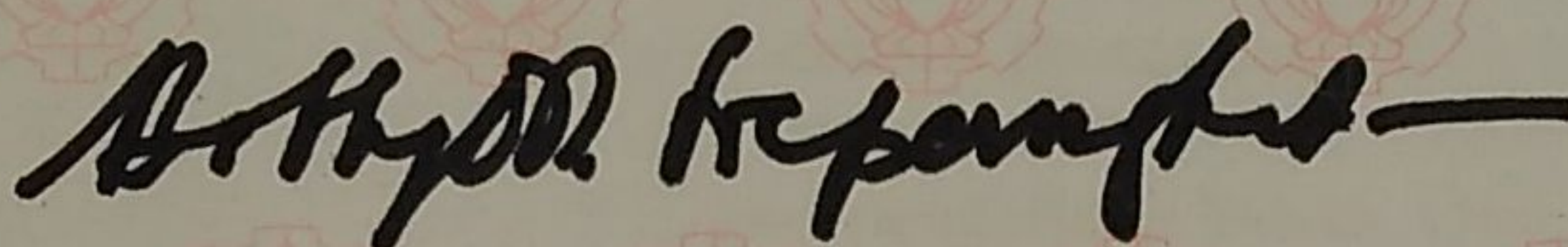
Oleh:

DIAN RIDLO PAMUJI

NRP. 2113201009

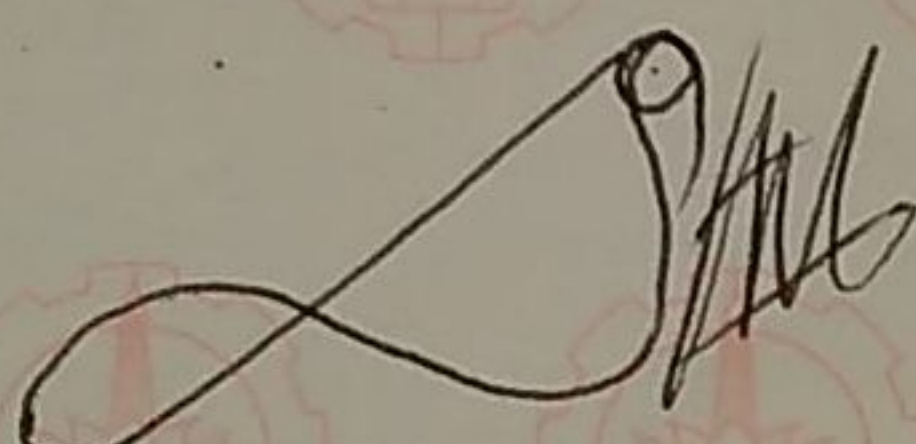
**Tanggal Ujian : 9 Juli 2015
Periode Wisuda : September 2015**

Disetujui oleh:



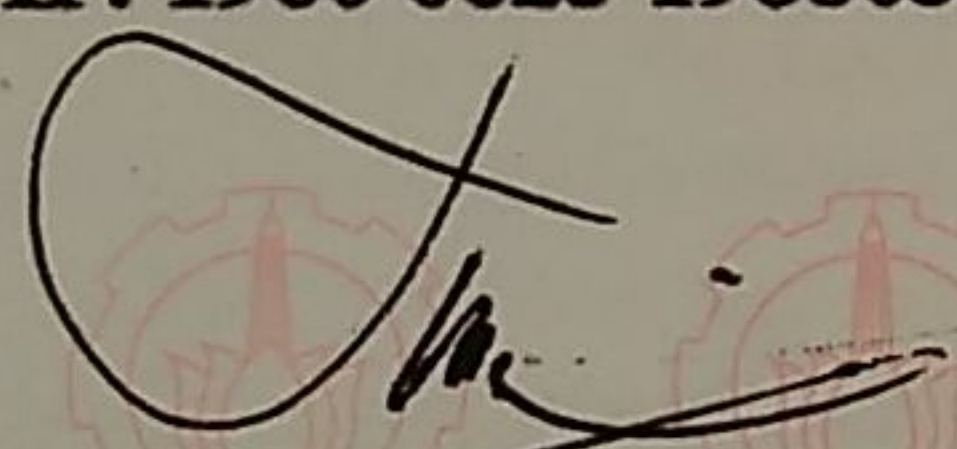
**1. Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
NIP. 1953 0516 197803 1 001**

(Pembimbing 1)



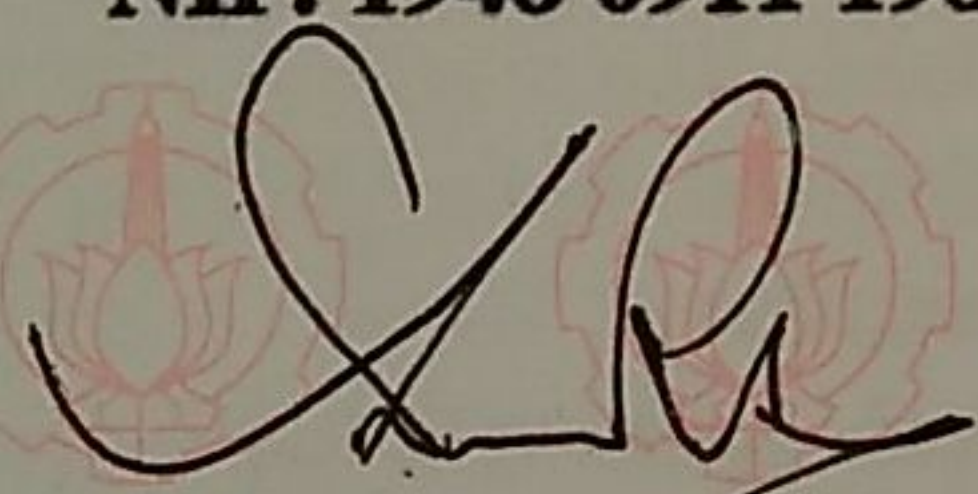
**2. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.
NIP. 1960 0623 198803 1 002**

(Pembimbing 2)



**3. Dr. Ir. Suharto, DEA.
NIP. 1948 0911 198103 1 001**

(Penguji)



**4. Ir. Winarto, DEA.
NIP. 1960 1213 198811 1 001**

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,



**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP. 19640405199002 1 001**

OPTIMASI MULTI RESPON MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI GREY-FUZZY PADA PROSES *END MILLING* MATERIAL ASSAB XW-42 DENGAN PENDINGINAN NITROGEN CAIR

Nama Mahasiswa : Dian Ridlo Pamuji
NRP : 2113201009
Pebimbing I : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D
Pembimbing II : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

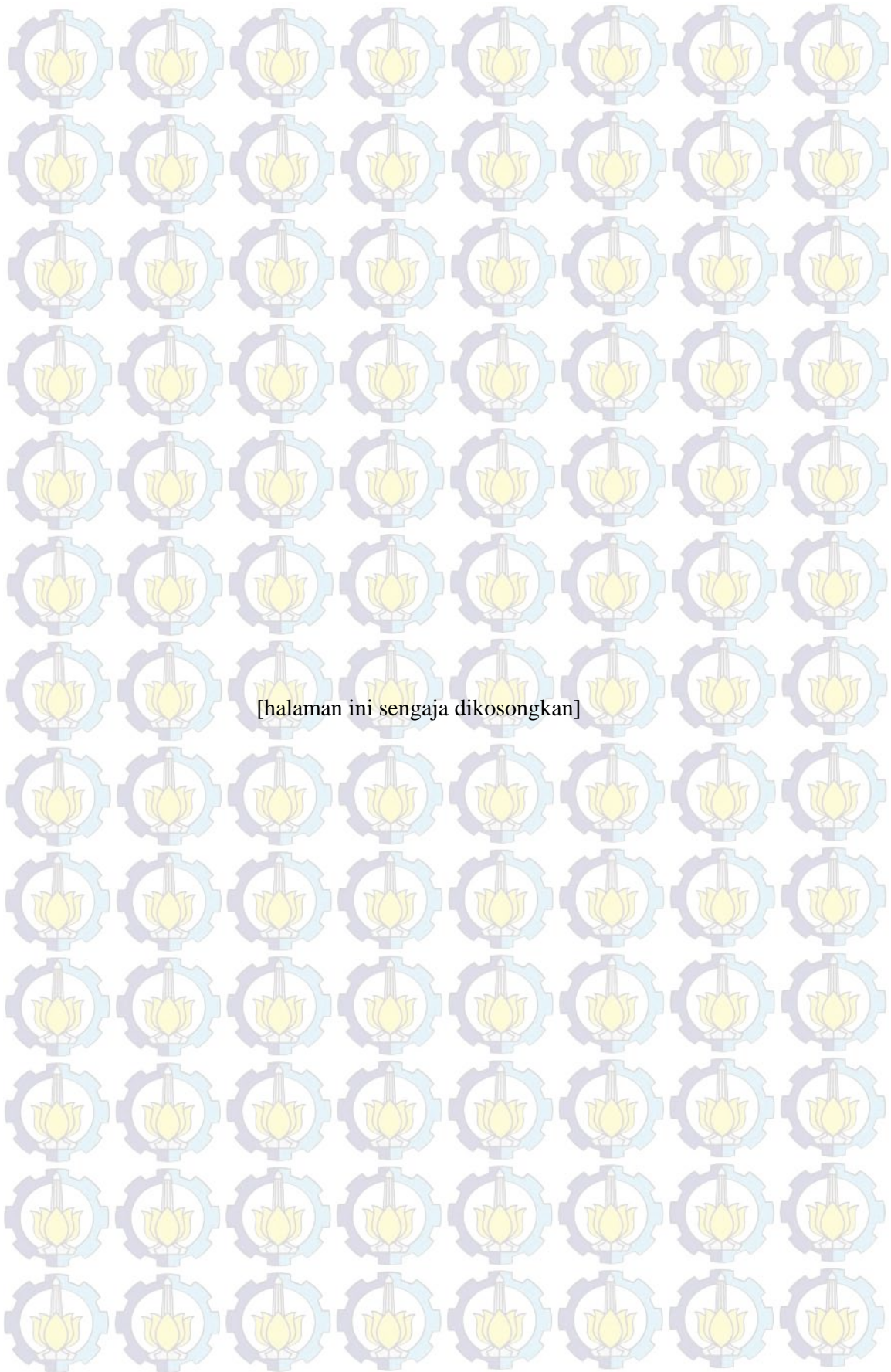
ABSTRAK

Proses *end milling* merupakan salah satu proses *freis* yang sangat luas penggunaannya pada industri manufaktur, seperti industri otomotif, pesawat terbang, dan *plastic molding*. Proses ini dapat digunakan untuk menghasilkan benda kerja dengan permukaan rata maupun bentuk-bentuk profil, radius, kantong dan alur. Penentuan kombinasi variabel proses yang tidak tepat pada proses *end milling* akan menghasilkan kekasaran permukaan dan tingkat keausan pahat yang tinggi serta dapat menurunkan laju pengerjaan bahan. Oleh karena itu perlu dilakukan pengaturan variabel-variabel proses *end milling* dengan pendinginan nitrogen cair yang tepat, sehingga dapat menurunkan kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat serta dapat meningkatkan laju pengerjaan bahan.

Suatu penelitian telah dilakukan untuk menentukan kombinasi variabel-variabel proses *end milling* pada material ASSAB XW-42 dengan pendingin nitrogen cair untuk meminimalkan respon kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat serta memaksimalkan laju pengerjaan bahan secara serentak. Variabel-variabel proses yang divariasikan adalah *flow rate* cairan pendingin (0,2 l/menit dan 0,5 l/menit), kecepatan potong (78,5 m/menit, 94,2 m/menit dan 109,9 m/menit), kecepatan makan (390 mm/menit, 440 mm/menit dan 490 mm/menit) dan kedalaman potong aksial (0,3 mm, 0,6 mm dan 0,9 mm) dan Pahat yang digunakan pada penelitian ini adalah *end mill solid carbide* yang memiliki empat mata potong dengan diameter 10 mm. Rancangan percobaan ditetapkan dengan menggunakan metode Taguchi berupa matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ dan replikasi sebanyak dua kali. Metode optimasi yang digunakan adalah kombinasi dari metode *grey relational analysis* dan logika *fuzzy*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variabel-variabel proses *flow rate*, kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong aksial memiliki kontribusi dalam menurunkan total variansi dari respon secara serentak berturut-turut sebesar 27,91%, 25,75%, 8,12% dan 26,62%. Untuk memperoleh variabel respon kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat yang minimal serta laju pengerjaan bahan yang maksimal, variabel proses *flow rate* diatur sebesar 5 l/menit, kecepatan potong diatur sebesar 109,9 m/menit, kecepatan makan diatur sebesar 440 mm/menit dan kedalaman potong aksial diatur sebesar 0,9 mm.

Kata kunci : proses *end mill*, kekasaran permukaan, laju pengerjaan bahan, keausan pahat, Taguchi-grey-fuzzy.



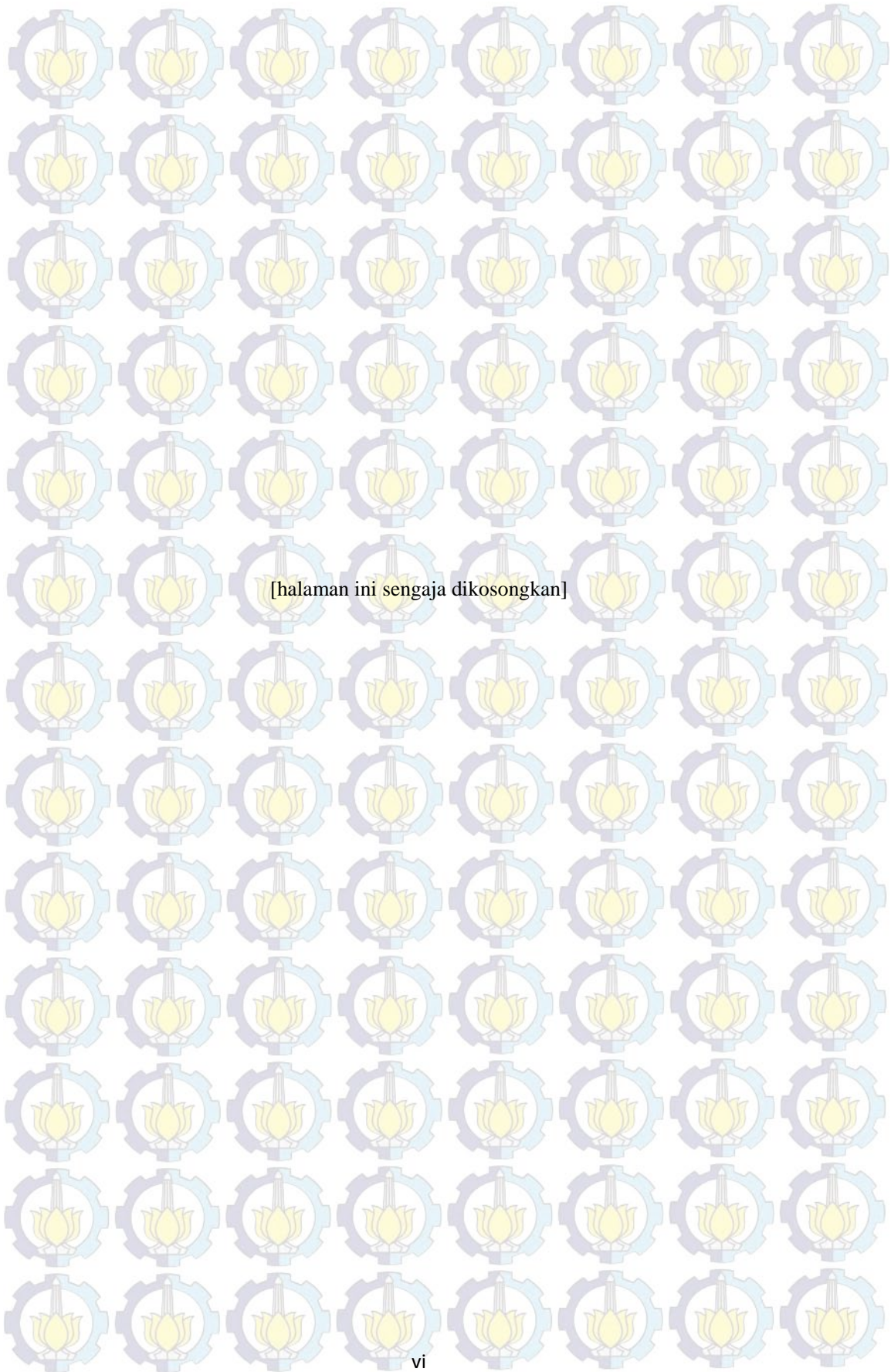
OPTIMIZATION OF MULTI RESPONSE USING TAGUCHI GREY-FUZZY END MILLING PROCESS MATERIAL ASSAB XW-42 WITH COOLING LIQUID NITROGEN

Student Name : Dian Ridlo Pamuji
NRP : 2113201009
Advisor : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D
Co. Advisor : Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.

ABSTRACT

A research was conducted for the optimization of the end milling process ASSAB XW-42 tool steel with multiple performance characteristics based on the orthogonal array with Taguchi-grey-fuzzy method. Liquid nitrogen was applied as coolant. The experimental studies were conducted under varying the liquid nitrogen cooling flow rate (FL), cutting speed (V_c), feeding speed (V_f) and axial depth of cut (A_a). The optimized multiple performance characteristics were surface roughness (SR), flank wear (VB) and material removal rate (MRR). An orthogonal array, signal-to-noise (S/N) ratio, grey relational analysis, grey-fuzzy reasoning grade and analysis of variance were employed to the study the multiple performance characteristics. Experimental results show that flow rate gives the highest contribution for reducing the total variation of the multiple responses, followed by cutting speed, feeding speed and axial depth of cut. The minimum surface roughness, flank wear and maximum material removal rate could be obtained by using the values of flow rate, cutting speed, feeding speed and axial depth of cut of 0.5 l/minute, 109.9 m/minute, 94.2 mm/minute, and 0.9 mm respectively.

Keywords: Taguchi, ASSAB XW-42, end milling, liquid nitrogen, grey-fuzzy.



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran ALLAH SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis diberi kesempatan untuk dapat menyelesaikan penyusunan Tesis ini. Tesis dengan judul **“OPTIMASI MULTI RESPON MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI GREY-FUZZY PADA PROSES *END MILLING* MATERIAL ASSAB XW-42 DENGAN PENDINGINAN NITROGEN CAIR”** disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak atas segala bantuan dan dorongan serta dedikasinya yang telah membantu penyusunan Tesis ini hingga selesai. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. selaku Kepala Program Studi Teknik Mesin Program Pascasarjana FTI - ITS.
2. Bapak Ir. Bobby O.P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D. sebagai dosen pembimbing pertama.
3. Bapak Ir. Hari Subiyanto, M.Sc. sebagai dosen pembimbing kedua.
4. Bapak Dr. Ir. Soeharto, DEA. dan Bapak Ir. Winarto, DEA. sebagai dosen penguji seminar tesis.
5. Ayah dan ibu tersayang yang telah banyak memberikan kekuatan dan semangat serta doa restunya kepada penulis.
6. Istriku tercinta Lailatul Munawaroh, S.Pd. dan anak-anakku tersayang Kaeysa Amira Faleeha dan Muhammad Athaya Razin Al Hafidz yang telah memberikan semangat, kekuatan dan motivasi kepada penulis.
7. Seluruh staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin yang selalu memberi atmosfer kampus yang menyenangkan.
8. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Program Pascasarjana ITS.
9. Teman-teman kuliah S2 Rekayasa dan Sistem Manufaktur angkatan 2013 Pak Gultom, Kurnia, Nusron, Faisal, Asmar, Pak Anam, Pak Wahid dan Farrih

serta teman seperjuangan Hasriadi, Mega, Amirul dan Galih atas segala bantuan dan dukungannya.

10. Dosen dan staf. Lab. Manufaktur PPNS yang telah banyak membantu selama proses penelitian.

11. Dosen pengajar dan Staf Lab. Politeknik Negeri Banyuwangi Ibu Nuraini Lusi, Bapak Khairul Muzaka, Bapak Ngurah, Bapak Affandi, Ibu Ika, Pak Eko, Pak Arofi dan Novi yang telah memberikan motivasi kepada penulis.

12. Teman-teman Lab. Manufaktur Teknik Mesin–ITS.

13. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu-satu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tesis ini masih banyak kekurangannya. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata penulis berharap semoga Tesis ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan khususnya di bidang proses manufaktur. Aamiin.

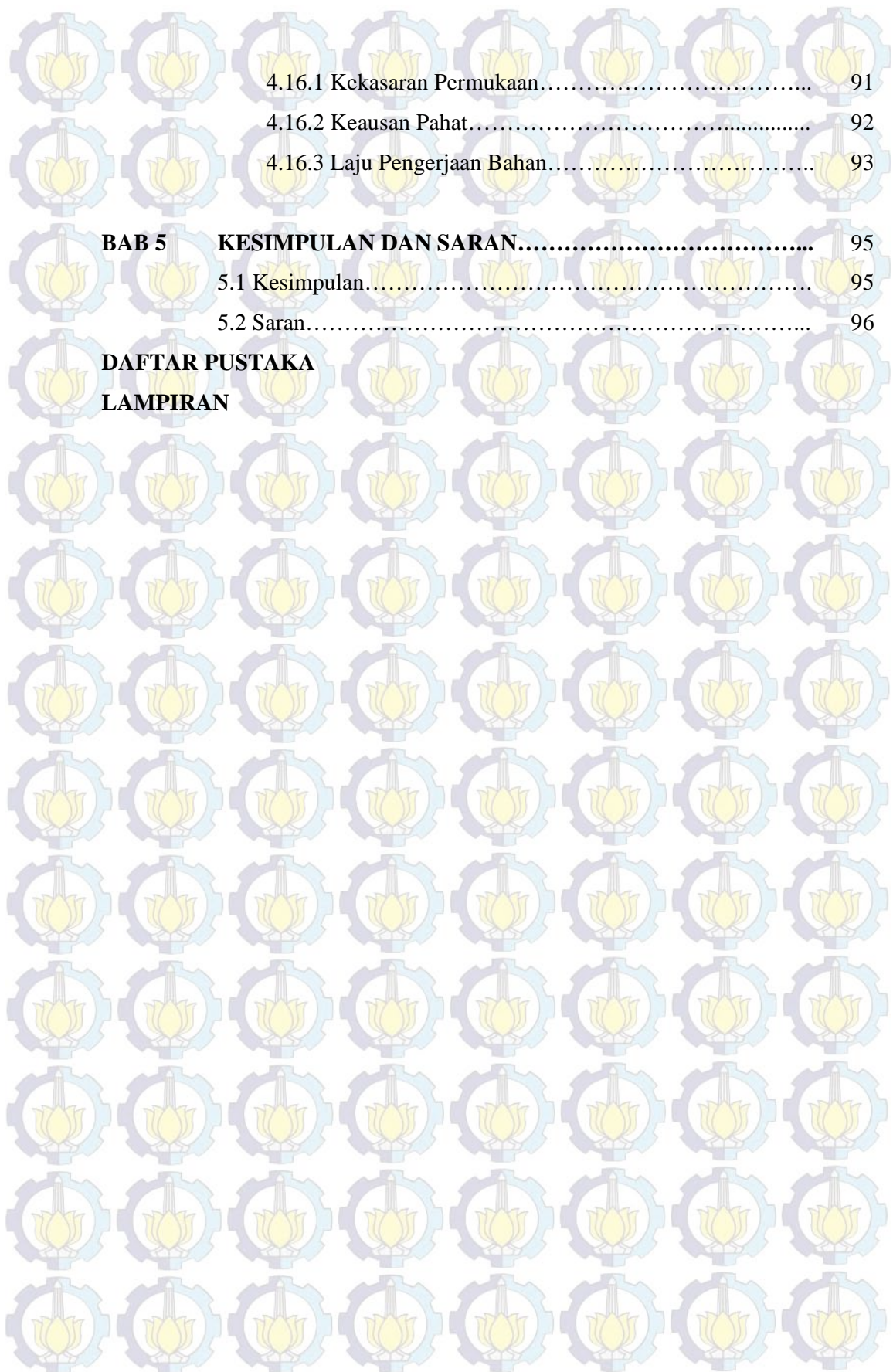
Surabaya, 31 Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Batasan Masalah	6
1.4 Asumsi Penelitian	6
1.5 Tujuan Penelitian.....	6
1.6 Manfaat Penelitian.....	7
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	9
2.1 Kajian Pustaka.....	9
2.2 Proses Freis.	11
2.3 Pahat <i>End Mill</i>	14
2.4 Elemen Dasar Proses Freis	15
2.5 Temperatur Pemotongan.....	16
2.6 Cairan Pendingin.....	19
2.6.1 Cairan Pendingin Konvensional.....	19
2.6.2 Pendinginan <i>Cryogenic</i>	20
2.7 Kekasaran Permukaan	23
2.8 Keausan Pahat.....	28
2.9 Laju Pengerjaan Bahan.....	30
2.10 Metode Taguchi	30
2.11 Metode Taguchi – <i>Grey-Fuzzy</i>	39
2.12 Interpretasi Hasil Percobaan	47

BAB 3	METODE PENELITIAN	51
3.1	Tahapan Penelitian	51
3.2	Variabel Penelitian	53
3.3	Karakteristik Respon Optimal	54
3.4	Bahan dan Peralatan	54
3.5	Rancangan Percobaan	58
3.5.1	Pemilihan Level dari Variabel.....	58
3.5.2	Pemilihan Matriks Ortogonal	59
3.5.3	Prosedur Percobaan	61
BAB 4	OPTIMASI MULTI RESPON DAN PEMBAHASAN.....	65
4.1	Data Hasil Eksperimen.....	65
4.2	Perhitungan Rasio S/N.....	67
4.3	Normalisasi Rasio S/N.....	68
4.4	Perhitungan <i>Grey Relational Coefficient</i> (GRC).....	69
4.5	<i>Fuzzyfication</i>	71
4.6	<i>Fuzzy Rules</i>	72
4.7	<i>Defuzzification</i>	73
4.8	Hasil Optimasi.....	74
4.9	Analisis Variansi dan Persen Kontribusi.....	76
4.10	Pengujian Asumsi Residual.....	78
4.10.1	Uji Independen.....	78
4.10.2	Uji Identik.....	79
4.10.3	Uji Distribusi Normal.....	79
4.11	Prediksi Multi Respon Optimum.....	80
4.12	Percobaan Konfirmasi.....	82
4.13	Pengujian Perbedaan Respon Hasil Kombinasi Awal dan Hasil Kombinasi Optimum.....	85
4.14	Perbandingan Antara Respon Hasil Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum.....	88
4.15	Pengaruh Variabel Proses Terhadap Multi Respon.....	90
4.16	Pengaruh Variabel Proses Terhadap Respon Individu.....	90



4.16.1 Kekasaran Permukaan..... 91

4.16.2 Keausan Pahat..... 92

4.16.3 Laju Pengerjaan Bahan..... 93

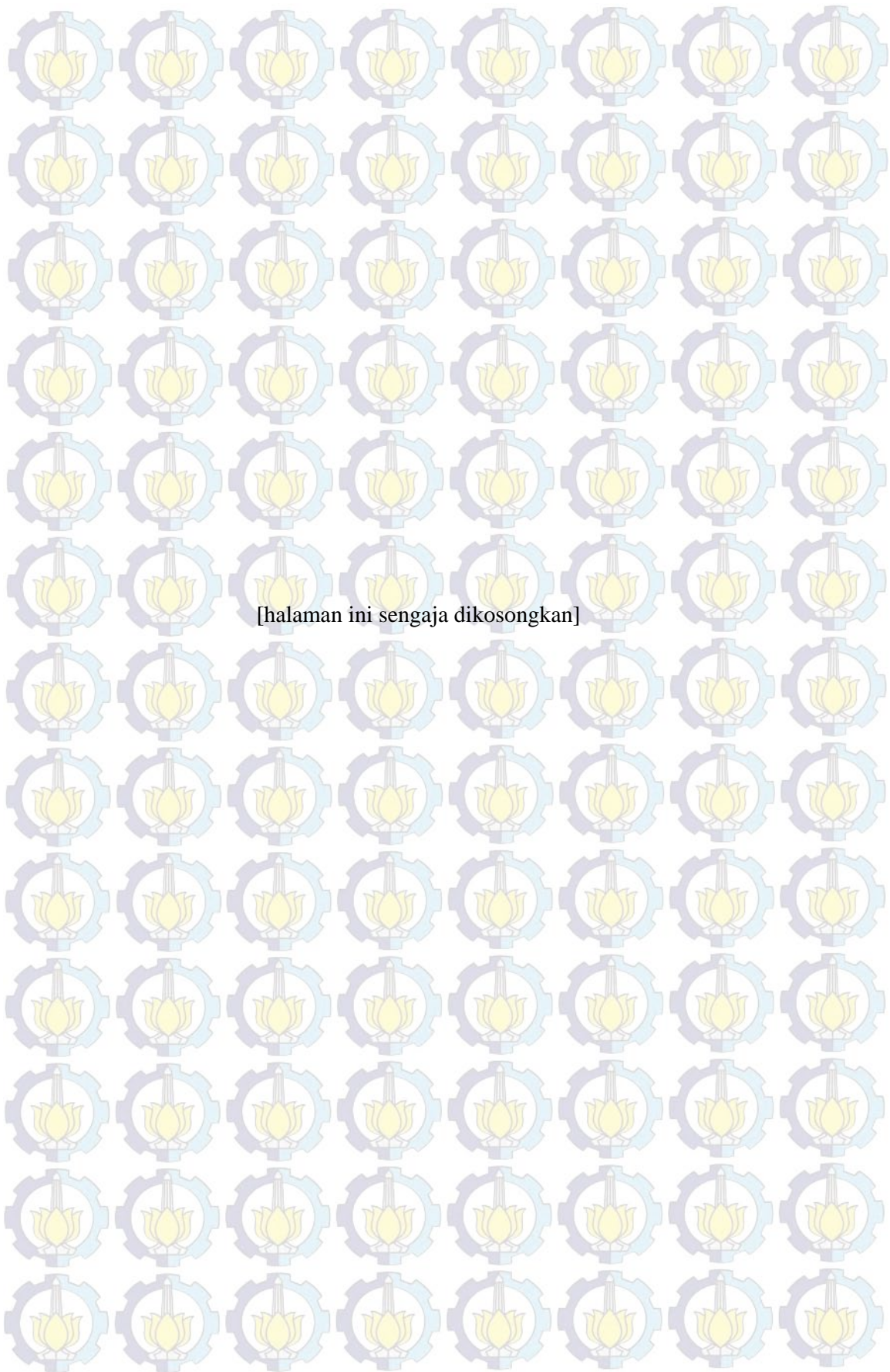
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN..... 95

5.1 Kesimpulan..... 95

5.2 Saran..... 96

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tiga Klasifikasi Proses Freis.....	12
Gambar 2.2	Freis Naik dan Freis Turun	13
Gambar 2.3	Jumlah Mata Potong Pahat <i>End Mill</i>	14
Gambar 2.4	Proses Freis Datar dan Freis Tegak	15
Gambar 2.5	Sumber Panas Pada Proses Pemotongan Logam.....	17
Gambar 2.6	Distribusi Temperatur pada geram dan pahat.....	18
Gambar 2.7	Temperatur Pahat, Geram dan Benda Kerja Pada Proses Freis....	18
Gambar 2.8	Kekerasan Berbagai Jenis Pahat Sebagai Fungsi Temperatur.....	19
Gambar 2.9	Pengaruh Kecepatan Potong Terhadap Temperatur dengan Metode Pendinginan yang Berbeda.....	21
Gambar 2.10	Pengaruh Kecepatan Potong Terhadap Temperatur dengan Metode Pendinginan yang Berbeda.....	22
Gambar 2.11	Pengaruh Gerak Makan Terhadap Keausan Tepi Pahat dengan Metode Pendinginan yang Berbeda.....	22
Gambar 2.12	Pengaruh Gerak Makan Terhadap Keausan Tepi Pahat dengan Metode Pendinginan yang Berbeda.....	23
Gambar 2.13	Penyimpangan Rata-Rata Aritmatika.....	24
Gambar 2.14	Parameter Dalam Profil Permukaan.....	25
Gambar 2.15	Ilustrasi Kekasaran Permukaan Secara Teoritik.....	28
Gambar 2.16	Keausan <i>End Mill</i>	29
Gambar 2.17	Langkah-Langkah Optimasi Taguchi- <i>Grey-Fuzzy</i>	40
Gambar 2.18	Fungsi Keanggotaan Kurva Segitiga.....	44
Gambar 2.19	Fungsi Keanggotaan Kurva Trapesium.....	45
Gambar 3.1	Diagram Alir Tahapan Penelitian	49
Gambar 3.2	Dimensi Benda Kerja.....	52
Gambar 3.3	Pahat <i>End Mill</i>	53
Gambar 3.4	Mesin CNC YCM MV 66A.....	53
Gambar 3.5	Skema Instalasi Peralatan Pendingin Nitrogen Cair.....	54
Gambar 3.6	Nikon <i>Measurescope</i>	54

Gambar 3.7	Mitutoyo <i>Surfrest</i> SJ 310	55
Gambar 3.8	<i>Stopwatch</i>	55
Gambar 3.9	Jangka Sorong.....	56
Gambar 3.10	Meja Rata	56
Gambar 3.11	Skema Proses Pemotongan.....	57
Gambar 3.12	Skema Pengukuran Kekasaran Permukaan	60
Gambar 3.13	Posisi Pengukuran Keausan Pahat <i>End Mill</i>	61
Gambar 3.14	Skema Pengukuran Keausan Pahat <i>End Mill</i>	62
Gambar 4.1	Fungsi Keanggotaan Masing-Masing Respon.....	69
Gambar 4.2	Fungsi Keanggotaan <i>Grey Fuzzy Reasoning Grade</i>	70
Gambar 4.3	Plot Rata-Rata pada Masing-Masing Level Variabel Proses.....	73
Gambar 4.4	Plot ACF.....	76
Gambar 4.5	Plot Residual <i>Versus Observation Order</i>	77
Gambar 4.6	Plot Uji Distribusi Normal.....	78
Gambar 4.7	Plot Interval Keyakinan Hasil Prediksi dan Percobaan Konfirmasi.....	82
Gambar 4.8	Grafik Pengaruh Keausan Pahat Terhadap Kekasaran Permukaan.....	90

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai Kekasaran Dan Tingkat Kekasaran	26
Tabel 2.2	Nilai Kekasaran yang Dicapai oleh Beberapa Proses Pemesinan	27
Tabel 2.3	Matriks Ortogonal L_{18}	34
Tabel 2.4	Tabel Analisis Variansi (ANAVA).....	36
Tabel 2.5	Penempatan Rasio S/N.....	41
Tabel 2.6	Tabel Respon <i>Grey-Fuzzy Reasoning Grade</i>	46
Tabel 3.1	Variabel Proses Penelitian	59
Tabel 3.2	Total Derajat Kebebasan Variabel Bebas dan Levelnya.....	60
Tabel 3.3	Matriks Ortogonal L_{18}	60
Tabel 3.4	Tampilan Data Hasil Eksperimen	61
Tabel 4.1	Data Hasil Eksperimen.....	66
Tabel 4.2	Rasio S/N untuk Masing-Masing Respon.....	68
Tabel 4.3	Normalisasi Rasio S/N Masing-Masing Respon.....	69
Tabel 4.4	<i>Deviation Sequence</i> dan <i>Grey Relational Coefficient</i>	70
Tabel 4.5	<i>Fuzzy Rules</i>	72
Tabel 4.6	<i>Grey Fuzzy Reasoning Grade</i>	74
Tabel 4.7	Nilai GFRG pada Matrik Ortogonal.....	74
Tabel 4.8	Rata-Rata GFRG pada Masing-Masing Level Variabel Proses.....	75
Tabel 4.9	Kombinasi Variabel Proses Respon Optimum.....	76
Tabel 4.10	ANAVA dan Persen Kontribusi GFRG.....	77
Tabel 4.11	Kombinasi Faktor untuk Kombinasi Optimum.....	82
Tabel 4.12	Hasil Percobaan Konfirmasi pada Kombinasi Optimum.....	82
Tabel 4.13	Rasio S/N pada Kombinasi Optimum.....	83
Tabel 4.14	Nilai GRC dan GFRG Percobaan Konfirmasi untuk Kombinasi Optimum.....	83
Tabel 4.15	Hasil Uji Kenormalan Data pada Kombinasi Optimum.....	85
Tabel 4.16	Hasil Uji Kenormalan Data pada Kombinasi Awal.....	85
Tabel 4.17	Hasil Uji Kesamaan Variansi.....	86
Tabel 4.18	Hasil Uji Kesamaan Rata-Rata.....	87

Tabel 4.19	Pengaturan Level Kombinasi Awal.....	88
Tabel 4.20	Respon Percobaan Kombinasi Awal.....	88
Tabel 4.21	Rasio S/N Kombinasi Awal.....	89
Tabel 4.22	Perbandingan GFRG Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum....	89
Tabel 4.23	Perbandingan Respon Individu pada Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum.....	89
Tabel 4.24	Persen Kontribusi Faktor Signifikan Terhadap Respon Individu.....	91



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses *milling* atau freis merupakan proses pemesinan yang digunakan untuk menghasilkan benda kerja dengan permukaan rata maupun bentuk-bentuk profil, radius, kantong dan alur. Untuk melakukan pemotongan benda kerja, proses freis memerlukan pahat bermata potong jamak yang berputar (Rochim, 1993). Berdasarkan jenis pahat dan jenis operasinya, proses freis dapat diklasifikasikan atas freis peripheral (*slab milling*), freis muka (*face milling*) dan freis jari (*end milling*) (Kalpakjian dan Schmid, 2001). Pahat *end mill* merupakan salah satu pahat pada proses freis yang sangat luas penggunaannya pada industri manufaktur, seperti industri otomotif, pesawat terbang, dan *plastic molding*. Sisi potong pahat *end mill* terletak pada ujung muka dan pada sisi spiralnya. Untuk mendapatkan komponen-komponen mesin hasil proses freis yang sesuai dengan spesifikasi, maka pemilihan parameter-parameter pemotongan harus benar-benar diperhatikan. Gerak makan, putaran spindel dan kedalaman potong merupakan parameter-parameter utama pada proses freis yang bisa diatur langsung pada mesin freis. Parameter-parameter lain seperti jenis pahat dan cairan pendingin merupakan parameter yang tidak bisa diatur langsung pada mesin freis.

Pemilihan jenis pahat dan pengaturan parameter-parameter proses pemotongan yang tepat, akan mempengaruhi sifat mampu mesin (*machinability*) dari suatu material atau benda kerja. Jika suatu produk hasil dari proses pemesinan memiliki kekasaran permukaan rendah, gaya potong yang digunakan selama proses pemesinan rendah dan tingkat keausan pahat rendah, maka material tersebut dapat dianggap memiliki sifat mampu mesin yang baik.

Baja ASSAB XW-42 merupakan salah satu jenis baja perkakas yang memiliki tingkat kekerasan yang cukup tinggi, yaitu 30 HRC hingga 60 HRC. Beberapa dari karakteristiknya yang menyebabkan baja ASSAB XW-42 ini banyak digunakan di industri manufaktur adalah ketahanannya yang tinggi terhadap keausan, stabilitasnya yang tinggi dalam pengerasan, dan memiliki kekuatan tekan yang



tinggi. Baja ASSAB XW-42 banyak digunakan sebagai pahat atau alat potong (*cutting tools*), *punch* dan *dies* dalam proses pembentukan seperti *blanking*, *shearing*, *bending*, *forming*, dan *deep-drawing*.

Salah satu penggunaan dari baja ASSAB XW-42 adalah untuk *punch* dan *dies* pada proses pembentukan, sehingga hasil dari proses pemesinan baja ASSAB XW-42 dituntut memiliki kekasaran permukaan yang rendah dan kepresisian yang tinggi. Kekasaran permukaan merupakan karakteristik kualitas yang sering disyaratkan pada suatu produk, sehingga penelitian tentang parameter pemotongan yang mempengaruhi kekasaran permukaan cukup banyak dilakukan. Suatu penelitian mengenai pengaruh parameter proses freis dengan menggunakan pahat *end mill* terhadap kekasaran permukaan pada material AISI H13 telah dilakukan oleh Shammari dkk. (2012). Hasil penelitian menyatakan bahwa *spindle speed* dan *feed rate* berpengaruh terhadap kekasaran permukaan pada proses freis material AISI D2. Selain penelitian terhadap material AISI D2, juga telah dilakukan penelitian terhadap kekasaran permukaan material aluminium pada proses *end mill*. Hasil penelitian menyatakan bahwa kekasaran permukaan dipengaruhi oleh kedalaman potong selain oleh *spindle speed* dan *feed rate* (Hayajneh, 2007).

Faktor lain yang harus diperhatikan pada proses pemesinan selain kekasaran permukaan adalah keausan pahat. Keausan pahat merupakan faktor yang menentukan umur pahat. Umur pahat didefinisikan sebagai suatu periode waktu penggunaan pahat dimana rata-rata keausan tepi pahat telah mencapai 300 μm , atau maksimum keausan tepi yang terjadi adalah 600 μm (Rochim, 1993). Umur pahat adalah suatu pertimbangan ekonomi yang terpenting dalam pemotongan logam. Semakin pendek umur pahat, biaya yang dikeluarkan juga akan semakin besar karena seringnya dilakukan penggantian pahat.

Salah satu cara untuk memperpanjang umur pahat adalah dengan menggunakan cairan pendingin. Cairan pendingin dapat menurunkan panas yang terjadi akibat gesekan antara pahat dengan benda kerja selama proses pemotongan berlangsung. Cairan pendingin konvensional diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *oil-based fluid* dan *chemical fluid* (Yue dkk., 1998). *Oil-based fluid* terdiri dari minyak murni dan *soluble-oil* dengan bahan tambah, sedangkan *chemical fluid* terdiri dari minyak sintetis dan semi sintetis. Penggunaan cairan pendingin



konvensional pada industri, menyebabkan terjadinya banyak masalah kesehatan dan lingkungan (Yildiz dkk., 2008). Sejak komposisi cairan pendingin sangat kompleks, komponen tambahan tersebut lebih beracun dan dapat menyebabkan iritasi dari pada bahan dasarnya (Bienkowski, 1993). Salah satu alternatif cairan pendingin, selain cairan pendingin konvensional, adalah pendinginan dengan menggunakan *cryogenic*. *Cryogenic* merupakan teknik pendinginan pada suhu dibawah 0°C (Chetan dkk., 2015). Media pendinginan *cryogenic* yang sering digunakan adalah nitrogen cair (LN_2). Nitrogen cair memiliki titik didih yang sangat rendah, yaitu -196°C , tidak berwarna, tidak beracun, tidak mudah terbakar, tidak memperbesar kebakaran dan tidak korosif. Cairan pendingin yang ramah lingkungan dan aman bagi operator, seperti pendinginan menggunakan *cryogenic*, saat ini menjadi fokus penelitian pada proses pemesinan.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mempelajari pengaruh pendinginan *cryogenic* pada proses pemesinan. Ravi dan Kumar. (2011) melakukan penelitian pada proses *end mill* dengan material AISI H13. Metode pendinginan yang digunakan adalah *dry*, *wet* dan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair. Hasil penelitian menyatakan bahwa pendinginan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair dapat menurunkan keausan pahat dan kekasaran permukaan dibandingkan dengan *dry* dan *wet*. Shokrani dkk. (2012) melakukan penelitian pada material Inconel 718 terhadap kekasaran permukaan pada proses *end mill*. Metode pendinginan yang digunakan adalah tanpa pendingin dan pendinginan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendinginan dengan menggunakan nitrogen cair dapat menurunkan kekasaran permukaan sebesar 30%, dibandingkan dengan tanpa pendinginan. Penelitian pada material AISI D3 pada kondisi *dry*, *wet* dan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair terhadap temperatur pemotongan, gaya pemotongan, kekasaran permukaan, dan keausan pahat dengan menggunakan pahat *end mill*, telah dilakukan oleh Ravi dan Kumar (2012). Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur pemotongan, gaya pemotongan, kekasaran permukaan dan keausan pahat pada proses pemesinan dengan menggunakan nitrogen cair lebih rendah dibandingkan dengan hasil dari proses pemesinan *dry* dan *wet*. Penelitian tentang perbandingan *material removal rate* atau laju pengerjaan bahan proses pemesinan



material X12CrNiWTiB16-13 pada kondisi *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair dan *dry*, juga telah dilakukan oleh Hong dkk. (2000). Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju pengerjaan bahan pada kondisi *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi *dry*.

Penentuan kombinasi variabel proses yang tepat pada proses pemesinan untuk mencapai respon yang optimum sangat penting untuk dilakukan secara efektif. Hal ini bertujuan untuk mengurangi proses coba-coba, sehingga waktu dan biaya proses pemesinan dapat diminimalkan. Salah satu metode optimasi yang dapat digunakan dalam penelitian adalah metode Taguchi. Metode ini adalah salah satu metode yang efektif untuk mengendalikan kualitas produk secara *off-line*, yaitu usaha pengendalian atau perbaikan kualitas yang dimulai dari perancangan hingga pemrosesan produk. Akan tetapi, metode Taguchi digunakan untuk melakukan optimasi pada satu respon. Untuk optimasi multi respon dapat digunakan gabungan metode Taguchi dengan *grey relational analysis* (GRA), *fuzzy logic*, *genetic algorithm* (GA), maupun *weighted principal components analysis* (WPCA).

Penelitian tentang penentuan kombinasi beberapa variabel pada proses *end mill* material Inconel 718 dengan tujuan mengoptimalkan respon kekasaran permukaan dan laju pengerjaan material telah dilakukan oleh Maiyar dkk. (2013). Optimasi dilakukan dengan menggunakan gabungan metode Taguchi dan *grey relational analysis*. Variabel proses pemesinan yang digunakan adalah kecepatan potong, gerak makan dan kedalaman potong. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, kombinasi variabel proses kecepatan potong, gerak makan per-gigi dan kedalaman potong yang tepat mampu meningkatkan laju pengerjaan bahan 64,8% dan menurunkan kekasaran permukaan sebesar 9,52%.

Mahesh dan Rajesh (2014) melakukan penelitian tentang penentuan kombinasi beberapa variabel pada proses *end mill* material Al 7075-6 yang bertujuan mengoptimalkan respon kekasaran permukaan dan laju pengerjaan bahan secara serentak. Optimasi dilakukan dengan menggunakan kombinasi metode Taguchi dan logika *fuzzy*. Variabel proses pemesinan yang digunakan adalah putaran spindel, gerak makan, kedalaman potong, dan radius pojok. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedalaman potong dan radius pojok memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon.



Penelitian tentang optimasi multi respon dengan menggabungkan metode Taguchi dan *grey-fuzzy* pada proses *side milling* material SKD 61, juga telah dilakukan oleh Lu dkk. (2008). Variabel proses pemesinan yang digunakan adalah kecepatan makan, gerak makan per-gigi, kedalaman potong aksial, dan kedalaman potong radial. Variabel respon yang dioptimalkan adalah umur pahat dan laju pengerjaan bahan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi variabel proses putaran poros utama, gerak makan per-gigi, kedalaman potong aksial dan kedalaman potong radial mampu meningkatkan umur pahat sebesar 54% dan laju pengerjaan bahan sebesar 9,7%.

Berdasarkan evaluasi dari penelitian-penelitian yang ada, suatu penelitian tentang penentuan variabel-variabel proses *end mill* material ASSAB XW-42 untuk mengoptimalkan respon kekasaran permukaan, laju pengerjaan bahan dan keausan tepi pahat secara serentak akan dilakukan. Variabel-variabel proses pada penelitian ini adalah kecepatan potong, kecepatan makan, kedalaman potong dan *flow rate* cairan pendingin. Cairan pendingin pada penelitian ini menggunakan nitrogen cair. Metode optimasi yang akan digunakan adalah metode Taguchi-*grey-fuzzy*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dapat ditetapkan berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan adalah:

1. Apakah besarnya *flow rate* cairan pendingin, kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong, memiliki kontribusi terhadap variasi keseluruhan dari kekasaran permukaan, keausan tepi pahat serta laju pengerjaan bahan yang diamati secara serentak.
2. Bagaimana menentukan pengaturan yang tepat dari besarnya *flow rate* cairan pendingin, kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong, sehingga dapat menurunkan kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat serta dapat meningkatkan laju pengerjaan bahan.



1.3 Batasan Masalah

Agar tujuan penelitian dapat tercapai sesuai yang diinginkan dan berjalan lebih terarah, batasan masalah yang diberlakukan adalah sebagai berikut:

1. Tidak menghitung komponen biaya selama proses pemesinan.
2. Tidak membahas sistem kontrol, sistem elektronika dan pemrograman CNC yang digunakan pada proses pemesinan.
3. Cairan *cyogenic* yang digunakan adalah nitrogen cair.
4. Tidak membahas proses perlakuan panas pada material yang digunakan.
5. Pahat *end mill* yang digunakan memiliki 4 mata potong.

1.4 Asumsi Penelitian

Adapun asumsi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Alat ukur yang digunakan dalam kondisi baik dan sudah terkalibrasi.
2. Faktor-faktor yang tidak diteliti dianggap selalu konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.
3. Tidak ada interaksi antar faktor yang diteliti.
4. Mesin yang digunakan dalam kondisi baik.
5. Material yang digunakan bersifat homogen.

1.5 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui besarnya kontribusi *flow rate* cairan pendingin, kecepatan potong, kecepatan makan, dan kedalaman potong terhadap variasi keseluruhan dari kekasaran permukaan, keausan tepi pahat serta laju pengerjaan bahan yang diamati secara serentak.
2. Menentukan pengaturan yang tepat besarnya *flow rate* cairan pendingin, kecepatan potong, kecepatan makan, dan kedalaman potong, memiliki kontribusi dalam menurunkan kekasaran permukaan, dan keausan tepi pahat serta meningkatkan laju pengerjaan bahan.



1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai bahan referensi bagi penelitian berikutnya yang sejenis dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang optimasi kekasaran permukaan, laju pengerjaan bahan dan keausan tepi pahat, pada proses *end milling* dengan pendinginan *cryogenic*.
2. Menambah *database* tentang pengaturan variabel-variabel proses pemesinan khususnya proses *end mill* untuk meminimalkan kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat serta memaksimalkan laju pengerjaan bahan.



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Proses pemesinan tidak lepas dari *machinability* (sifat mampu mesin dari material). Hal ini dikarenakan sifat *machinability* mempunyai pengaruh terhadap hasil proses pemesinan yang dilakukan. Data *machinability* dari suatu material atau benda kerja diperoleh dengan melakukan eksperimen dalam proses pemesinan. Pada proses tersebut, parameter proses diubah-ubah untuk mendapatkan respon yang diamati. Kriteria yang paling sering digunakan untuk mengetahui sifat mampu mesin dari suatu material atau benda kerja adalah:

- a. Kekasaran permukaan (R_a).
- b. Keausan pahat (VB).
- c. Laju pengerjaan bahan (LPB).

Shammari dkk. (2012) melakukan penelitian tentang pengaruh variabel proses freis dengan menggunakan pahat *end mill* terhadap kekasaran permukaan pada material AISI D2. Variabel proses yang digunakan adalah putaran spindel (1250 rpm, 1600 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm, dan 3150 rpm), gerak makan (640 mm/min, 1120 mm/min, 1520 mm/min, 1840 mm/min, dan 2000 mm/min) dan kedalaman potong (0,10 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm dan 0,5 mm). Hasil penelitian menyatakan bahwa putaran spindel memiliki kontribusi terbesar dalam menurunkan kekasaran permukaan, yaitu 48,960% kemudian diikuti oleh feedrate dengan kontribusi sebesar 27,711% dan kedalaman potong dengan kontribusi sebesar 2,562 %.

Keausan pahat merupakan faktor yang menentukan umur pahat. Umur pahat didefinisikan sebagai suatu periode waktu penggunaan pahat dimana rata-rata keausan tepi pahat telah mencapai 300 μm , atau maksimum keausan tepi yang terjadi adalah 600 μm (Rochim, 1993). Umur pahat adalah suatu pertimbangan ekonomi yang terpenting dalam pemotongan logam. Semakin pendek umur pahat, biaya yang dikeluarkan juga akan semakin besar karena seringnya dilakukan penggantian pahat. Salah satu cara untuk memperpanjang umur pahat adalah



dengan menggunakan cairan pendingin. Cairan pendingin dapat menurunkan panas yang terjadi akibat gesekan antara pahat dengan benda kerja selama proses pemotongan berlangsung. Cairan pendingin yang ramah lingkungan dan aman bagi operator, seperti pendinginan menggunakan *cryogenic*, saat ini menjadi fokus penelitian pada proses pemesinan.

Ravi dkk. (2011) melakukan penelitian pada proses *end mill* dengan material AISI H13 terhadap temperatur pemotongan, keausan tepi pahat, kekasaran permukaan dan gaya potong. Metode pendinginan yang digunakan adalah *dry*, *wet* dan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair. Variabel proses yang digunakan adalah kecepatan potong (75, 100, dan 125 m/min), gerak makan (0,02 mm/tooth) dan kedalaman potong aksial (0,5 mm). Hasil penelitian menyatakan bahwa pada kecepatan potong 125 m/min dan gerak makan 0,02 mm/tooth, temperatur pemotongan adalah sebesar 582°C untuk *dry machining*, 396°C untuk *wet machining* dan 246°C untuk pendinginan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair dapat menurunkan temperatur pemotongan sebesar 57% dibandingkan dengan *dry machining* dan sebesar 37% dibandingkan dengan *wet machining*. Rata-rata keausan tepi pahat adalah sebesar 0,282 mm untuk *dry machining*, 0,210 mm untuk *wet machining* dan 0,186 mm untuk pendinginan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan keausan tepi pahat sebesar 34% dibandingkan dengan *dry machining* dan sebesar 11% dibandingkan dengan *wet machining*. Gaya potong F_x adalah sebesar 336 N untuk *dry machining*, 282 N untuk *wet machining* dan 256 N untuk pendinginan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair. Gaya potong F_y adalah sebesar 381 N untuk *dry machining*, 328 N untuk *wet machining* dan 286 N untuk pendinginan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair. Gaya potong F_z adalah sebesar 398 N untuk *dry machining*, 346 N untuk *wet machining* dan 294 N untuk pendinginan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair dapat menurunkan gaya potong F_x , F_y , dan F_z sebesar 23%, 24% dan 26% dibandingkan dengan *dry machining* dan 9%, 12% dan 15% dibandingkan dengan *wet machining*. Rata-rata keausan tepi pahat pada kecepatan potong 100 m/min dan gerak makan 0,02 mm/tooth adalah sebesar



3,92 μm untuk *dry machining*, 3,21 μm untuk *wet machining* dan 2,32 μm untuk pendinginan *cryogenic* dengan menggunakan nitrogen cair. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan kekasaran permukaan sebesar 40% dibandingkan dengan *dry machining* dan sebesar 27% dibandingkan dengan *wet machining*.

Penelitian tentang optimasi multi respon dengan menggabungkan metode Taguchi dan *grey-fuzzy* pada proses *side milling* material SKD 61, juga telah dilakukan oleh Lu dkk. (2008). Variabel proses pemesinan yang digunakan adalah kecepatan makan, gerak makan per-gigi, kedalaman potong aksial, dan kedalaman potong radial. Variabel respon yang dioptimalkan adalah umur pahat dan laju pengerjaan bahan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi variabel proses putaran poros utama, gerak makan per-gigi, kedalaman potong aksial dan kedalaman potong radial mampu meningkatkan umur pahat sebesar 54% dan laju pengerjaan bahan sebesar 9,7%.

2.2 Proses Freis

Proses freis merupakan bagian dari proses pemesinan yang digunakan untuk menyelesaikan pembuatan suatu produk yang berasal dari proses sebelumnya, yaitu proses penuangan dan/atau proses pengolahan bentuk (Rochim, 1993). Untuk melakukan pemotongan benda kerja, proses freis memerlukan pahat bermata potong jamak yang berputar (Rochim, 1993). Permukaan yang disayat bisa berbentuk datar, menyudut atau melengkung begitu juga dengan permukaan benda kerja bisa juga berbentuk kombinasi dari beberapa bentuk.

Berdasarkan jenis pisau dan jenis operasinya, proses freis dapat diklasifikasikan menjadi tiga. (Kalpakjian dan Schmid, 2001), yaitu:

1. Freis Periperal (*Slab Milling*)

Pada proses ini, permukaan yang difreis dihasilkan oleh gigi pahat yang terletak pada permukaan luar badan alat potong. Sumbu dari putaran pahat biasanya dianggap berada pada bidang yang sejajar dengan permukaan benda kerja yang disayat.

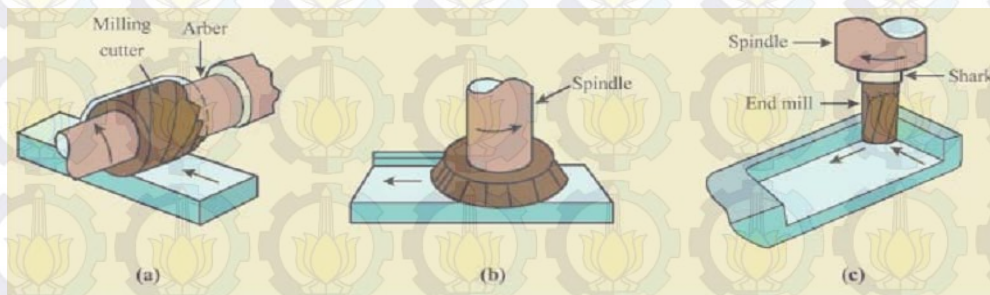


2. Freis Muka (*Face Milling*)

Pada proses freis muka, pahat dipasang pada poros utama (*spindle*) yang memiliki sumbu putar tegak lurus terhadap permukaan benda kerja. Permukaan hasil proses freis dihasilkan dari hasil penyayatan oleh ujung dan selubung pahat.

3. Freis Jari (*End Milling*)

Pahat pada proses freis jari biasanya berputar pada sumbu yang tegak lurus permukaan benda kerja. Pahat dapat digerakkan menyudut untuk menghasilkan permukaan menyudut. Gigi potong dari pahat terletak pada selubung pahat dan ujung badan pahat. Ilustrasi dari ketiga proses freis tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Tiga klasifikasi proses *milling*/freis : (a) *slab milling*, (b) *face Milling*, dan (c) *end milling* (Kalpakjian dan Schmid, 2001).

Berdasarkan arah relatif gerak makan meja mesin freis terhadap putaran pahat, proses freis juga dapat diklasifikasikan menjadi dua macam, yaitu (Schey, 2000):

1. Freis Turun (*Down Milling*)

Proses freis turun dinamakan juga sebagai *climb milling*. Arah dari putaran pahat sama dengan arah gerak makan meja mesin freis. Sebagai contoh, jika pahat berputar berlawanan arah dengan jarum jam, benda kerja akan disayat ke kanan. Penampang melintang bentuk geram (*chip*) untuk proses freis turun adalah seperti bentuk koma diawali dengan geram yang tebal dan kemudian menipis. Proses freis turun akan menyebabkan benda kerja lebih tertekan ke meja dan meja terdorong oleh pahat, sehingga mungkin pada suatu saat (secara periodik) gaya dorongnya akan melebihi gaya dorong ulir/roda gigi penggerak meja.

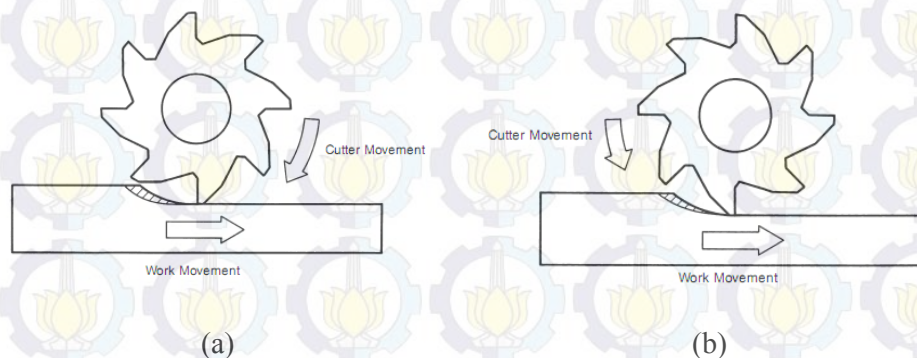


Apabila sistem kompensasi keterlambatan gerak balik (*back lash compensator*) tidak begitu baik, maka mengefrais turun akan mengakibatkan terjadinya getaran bahkan kerusakan. Dengan semakin baiknya konstruksi pada mesin freis maka mengefrais turun lebih cenderung dipilih sebab lebih produktif dan lebih halus hasilnya (Rochim, 1993).

2. Freis Naik (*Up Milling*)

Freis naik biasanya disebut sebagai freis konvensional (*conventional milling*). Gerak dari putaran pahat metode freis ini berlawanan arah terhadap gerak makan meja mesin. Sebagai contoh, apabila pahat berputar searah dengan jarum jam, maka benda kerja akan disayat ke arah kanan. Penampang melintang bentuk geram (*chip*) untuk proses freis naik juga seperti bentuk koma sama halnya dengan proses freis turun, namun bentuk geramnya diawali dengan bentuk geram yang tipis kemudian menebal. Freis naik banyak dimanfaatkan karena gaya dorong yang menyebabkan getaran pada mesin adalah rendah. Akan tetapi, mengefrais naik akan mempercepat keausan pahat karena mata potong lebih banyak menggesek benda kerja, yaitu pada saat mulai memotong (dimulai dari ketebalan benda kerja nol), selain itu permukaan benda kerja yang dihasilkan akan lebih kasar (Rochim, 1993).

Ilustrasi tentang kedua metode proses freis tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2 (a) Freis naik (*up milling*) dan (b) Freis turun (*down milling*) (Schey, 2000).



2.3 Pahat End Mill

Pahat *end mill* merupakan salah satu pahat pada proses freis yang sangat luas penggunaannya pada proses pemotongan logam (Rakowski, 1980). Pahat ini biasanya dipakai untuk membuat alur, kantong, dan radius pada bidang datar.

Secara umum, pahat *end mill* memiliki dua sampai enam mata potong seperti ditunjukkan pada gambar 2.3. Banyaknya mata potong yang digunakan ditentukan oleh material dan operasi pekerjaan yang dilakukan (Ku dan Chia, 2006). *End mill* yang memiliki dua mata potong biasa dipergunakan untuk mengerjakan material bukan besi (*non ferrous*) pada operasi pemesian sisi (*side milling*), pemesian slot (*slot milling*), pemesian kasar dan setengah penyelesaian (*rough or semi finish*).

End mill dengan mata potong lebih dari dua digunakan untuk mengerjakan material baja dan besi tuang pada operasi *side milling* dan *slotting* karena Pahat dengan empat mata potong atau lebih memiliki tingkat kekakuan yang tinggi (Ku dan Chia, 2006).



Gambar 2.3 Jumlah mata potong pahat *end milling* (Ku dan Chia, 2006)

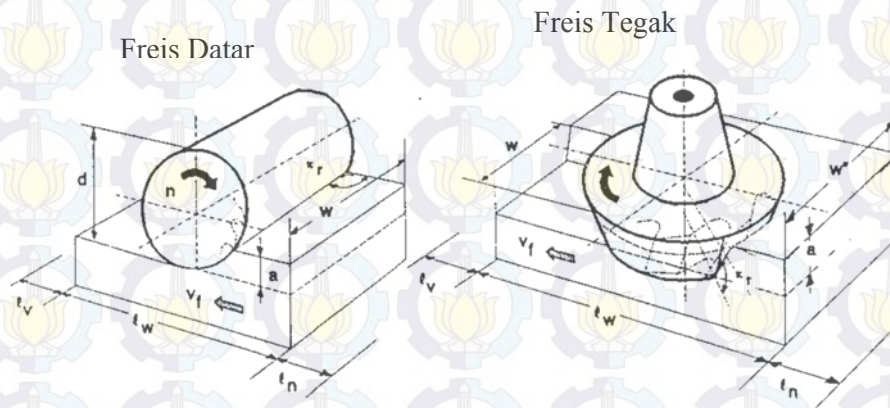
Beberapa permasalahan yang umum dihadapi ketika menggunakan pahat *end mill* pada proses pemesian freis adalah (ASME, 1985):

- Terjadinya kerusakan pada *end mill* karena pemilihan *end mill* dan benda kerja yang tidak tepat.
- Proses pekerjaan *finishing* yang tidak baik karena adanya distribusi kekerasan yang tidak rata pada benda kerja.
- Terjadinya distorsi dan getaran pada *end mill*.



2.4 Elemen Dasar Proses Freis

Elemen-elemen dasar pada proses freis dapat ditentukan dengan memperhatikan gambar 2.4. Dalam hal ini, persamaan yang dijelaskan pada persamaan 2.1 sampai dengan 2.5 berlaku untuk kedua cara mengefreis, yaitu freis tegak dan freis datar (Rochim, 1993).



Gambar 2.4 Proses freis datar dan freis tegak (Rochim, 1993)

Berdasarkan elemen-elemen dasar tersebut, kondisi pemotongan dapat ditetapkan dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut (Rochim, 1993):

- Kecepatan potong (m/menit)

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (2.1)$$

- Putaran poros utama (putaran/menit)

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi d} \quad (2.2)$$

- Kecepatan makan (mm/menit)

$$V_f = f_z z n \quad (2.3)$$

- Gerak makan per-gigi (mm/gigi)

$$f_z = V_f / (z n) \quad (2.4)$$

- Waktu pemotongan (menit)



$$t = \frac{l_t}{V_f} \quad (2.5)$$

Dengan:

w = lebar pemotongan

l_w = panjang material

a = kedalaman potong

d = diameter luar

z = jumlah gigi (mata potong)

K_r = sudut potong utama, 90° untuk pahat frais selubung

n = putaran poros utama

V_f = kecepatan makan

f_z = gerak makan per-gigi

l_t = panjang pemotongan

t = waktu pemotongan

$l_t = l_v + l_w + l_n$; mm,

$l_v \geq \sqrt{a(d-a)}$; untuk mengefrais datar

$l_v \geq 0$; untuk mengefrais tegak

$l_n \geq 0$; untuk mengefrais datar

$l_n = d/2$; untuk mengefrais tegak

2.5 Temperatur Pemotongan

Hampir seluruh energi pemotongan diubah menjadi panas melalui proses gesekan antara geram dengan pahat dan antara pahat dengan benda kerja (Rochim, 1993). Gambar 2.5 menunjukkan sumber panas selama proses pemotongan berlangsung. Panas yang terjadi selama proses pemotongan berlangsung, sebagian besar terbawa oleh geram, merambat melalui pahat dan sisanya mengalir menuju



ke sekeliling melalui benda kerja. Akibat panas yang terjadi selama proses pemotongan cukup tinggi, maka temperatur pahat terutama bidang geram dan bidang utama cukup tinggi. Prosentase panas yang terbawa oleh geram, merambat melalui pahat dan benda kerja, adalah sebagai berikut (Rochim, 1993):

$$Q = Q_c + Q_s + Q_w \dots \dots \dots (2.6)$$

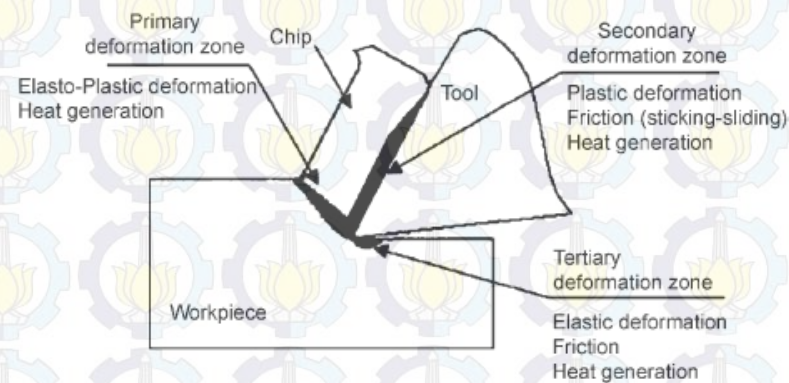
Dengan:

Q = Panas total yang dihasilkan (J/s atau W)

Q_c = Panas yang terbawa oleh geram dengan prosentase sekitar 75%

Q_s = Panas yang merambat melalui pahat dengan prosentase sekitar 20%

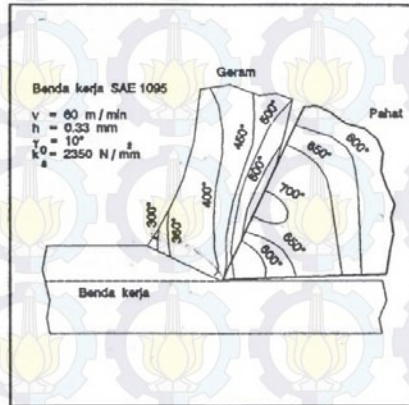
Q_w = Panas yang merambat melalui benda kerja dengan prosentase sekitar 5%



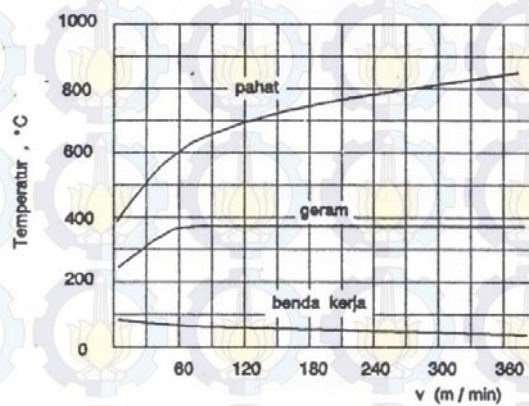
Gambar 2.5 Sumber panas pada proses pemotongan logam

(Yildiz & Nalbant, 2008)

Temperatur pahat pada saat proses pemotongan berlangsung lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur yang terbawa geram. Hal ini disebabkan karena pada saat proses pemotongan logam, temperatur pada geram akan turun bersamaan dengan putusnya geram, akan tetapi pahat akan terus mengalami gesekan dengan benda kerja sampai proses pemotongan selesai. Distribusi temperatur pada ujung pahat ditunjukkan pada 2.6. Gambar tersebut menunjukkan bahwa temperatur tertinggi terjadi pada bidang geram pada daerah geram mulai lepas dengan permukaan pahat. Gambar 2.7 menunjukkan temperatur pahat (pada bidang geram), temperatur rata-rata geram dan temperatur benda kerja sebagai fungsi dari kecepatan potong.

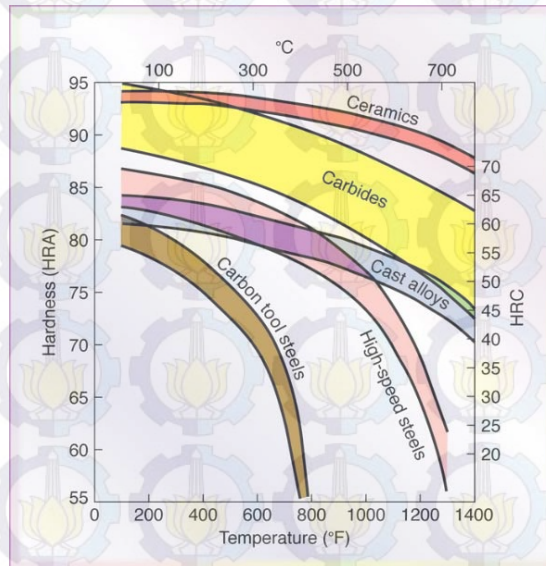


Gambar 2.6 Distribusi temperatur pada geram dan pahat (Rochim, 1993)



Gambar 2.7 Temperatur pahat, geram dan benda kerja pada proses freis (Rochim, 1993)

Peningkatan temperatur pahat selama proses pemotongan berlangsung dapat menurunkan kekerasan dari pahat seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Kekerasan berbagai jenis pahat sebagai fungsi temperatur (Kalpakjian & Schmid, 2001)

2.6 Cairan Pendingin

2.6.1 Cairan Pendingin Konvensional

Cairan pendingin pada proses pemotongan logam berfungsi untuk menurunkan koefisien gesek antara pahat dengan benda kerja, menurunkan panas akibat adanya gesekan antara pahat dengan benda kerja dan membersihkan geram pada permukaan benda kerja pada saat proses pemotongan berlangsung. Cairan pendingin konvensional diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *oil-based fluid* dan *chemical fluid* (Yue dkk., 1998). *Oil-based fluid* terdiri dari minyak murni dan *soluble-oil* dengan bahan tambah, sedangkan *chemical fluid* terdiri dari minyak sintetis dan semi sintetis.

1. Minyak murni (*straight oils*)

Minyak yang tidak dapat diemulsikan dan digunakan dalam bentuk sudah diencerkan. Minyak ini terdiri dari minyak mineral dasar atau minyak bumi, dan kadang mengandung pelumas yang lain seperti lemak, minyak tumbuhan, dan ester. Selain itu bisa juga ditambahkan aditif tekanan tinggi seperti *Chlorine*, *Sulphur* dan *Phosphorus*. Minyak murni menghasilkan pelumasan terbaik, akan tetapi sifat pendinginannya paling jelek diantara cairan pendingin yang lain.



2. Cairan sintetik (*synthetic fluids*)

Cairan sintetik tidak mengandung minyak bumi atau minyak mineral. Cairan ini dibuat dengan melarutkan borat, nitrit, nitrat atau fosfat kedalam air untuk mencegah korosi. Untuk menambah daya anti korosi, cairan sintetik ditambah amina atau amida. Cairan ini biasanya digunakan dalam bentuk sudah diencerkan (biasanya dengan rasio 3 sampai 10%). Keunggulan cairan sintetik adalah mempunyai daya pendingin yang tinggi, bahan dasar mudah larut dalam air dan tidak terjadi pertumbuhan bakteri.

3. Cairan emulsi (*soluble oil*)

Soluble oil akan membentuk emulsi ketika dicampur dengan air. Penambahan minyak nabati atau hewani dapat menaikkan daya lumas. Sedangkan penambahan sulfur, klorida, atau fosfor dapat menaikkan daya lumas pada tekanan dan temperatur tinggi. Cairan emulsi mempunyai daya lumas dan perlindungan terhadap korosi yang tinggi dibandingkan dengan cairan sintetik maupun semi sintetik.

4. Cairan semi sintetik (*Semi-synthetic fluids*)

Merupakan kombinasi antara minyak sintetik dan *soluble Oil*.

2.6.2 Pendinginan *Cryogenic*

Pendinginan *cryogenic* merupakan teknik pendinginan pada suhu jauh dibawah 0°C (Chetan dkk., 2015). Nitrogen cair, argon, oxygen, hydrogen dan helium merupakan fluida yang digunakan pada pendinginan *cryogenic* (Shokrani dkk., 2013). Nitrogen cair merupakan fluida *cryogenic* yang sering digunakan pada proses pemesinan. Adapun sifat dari nitrogen cair adalah sebagai berikut:

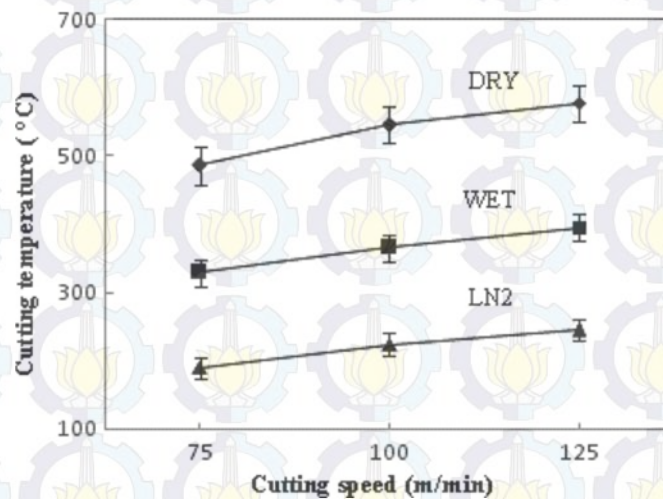
- Titik didih: -195.8°C
- Massa jenis: $808,5 \text{ Kg/m}^3$
- Tidak beracun
- Tidak berwarna
- Tidak menyebabkan kebakaran
- Tidak memperbesar kebakaran
- Tidak korosif



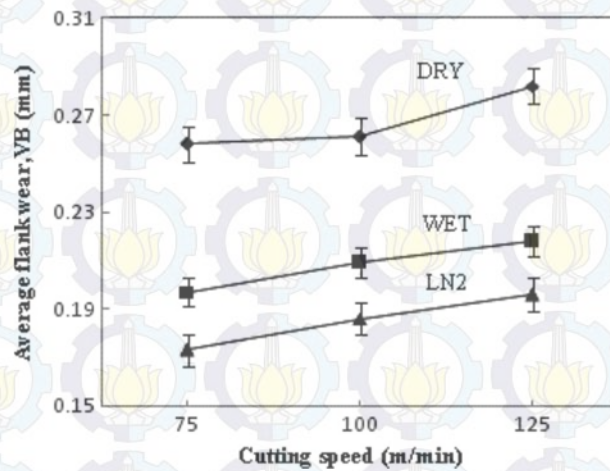
Keuntungan penggunaan nitrogen cair pada proses pemesinan adalah sebagai berikut:

- Meningkatkan umur pahat
- Meningkatkan laju pengerjaan bahan
- Menurunkan kekasaran permukaan benda kerja

Nitrogen cair pada proses pemesinan digunakan untuk menurunkan panas akibat terjadinya gesekan antara pahat dengan benda kerja selama proses pemesinan berlangsung. Ravi dan Kumar (2011) melakukan penelitian tentang pengaruh kecepatan potong terhadap temperatur dan keausan tepi pahat dengan metode pendinginan yang berbeda pada saat proses pemotongan berlangsung. Hasil penelitian menyatakan bahwa, temperatur pemotongan dan keausan tepi pahat akibat pengaruh kecepatan potong dengan pendingin nitrogen cair lebih rendah dibandingkan dengan *dry* dan *wet* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9 dan Gambar 2.10.

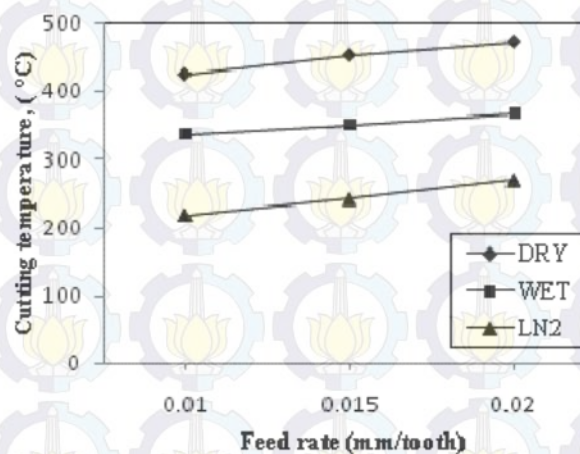


Gambar 2.9 Pengaruh kecepatan potong terhadap temperatur dengan metode pendinginan yang berbeda (Ravi & Kumar, 2011)

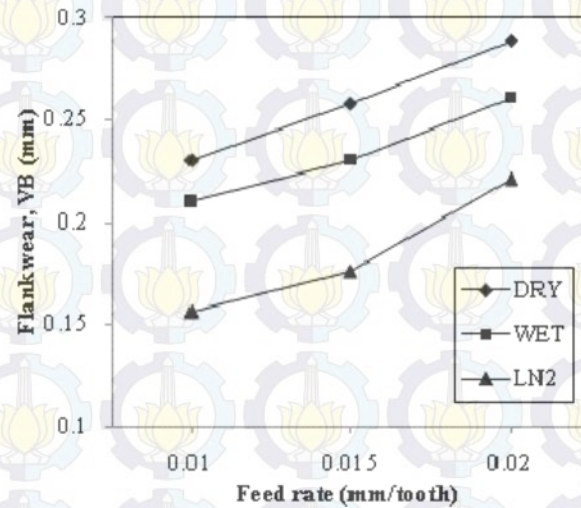


Gambar 2.10 Pengaruh kecepatan potong terhadap keausan tepi pahat dengan metode pendinginan yang berbeda (Ravi & Kumar, 2011)

Penelitian tentang pengaruh gerak makan terhadap temperatur dan keausan tepi pahat dengan metode pendinginan yang berbeda pada saat proses pemotongan berlangsung telah dilakukan oleh Ravi dan Kumar (2012). Hasil penelitian menyatakan bahwa, temperatur pemotongan dan keausan tepi pahat akibat pengaruh gerak makan dengan pendingin nitrogen cair lebih rendah dibandingkan dengan dry dan wet seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11 dan Gambar 2.12.



Gambar 2.11 Pengaruh gerak makan terhadap temperatur dengan metode pendinginan yang berbeda (Ravi & Kumar, 2012)

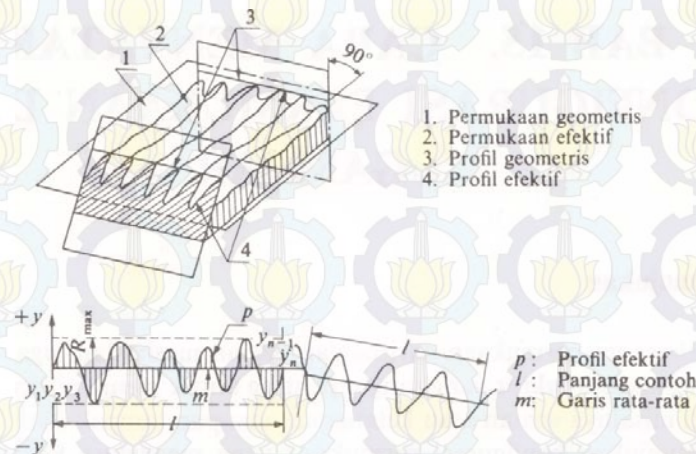


Gambar 2.12 Pengaruh gerak makan terhadap keausan tepi pahat dengan metode pendinginan yang berbeda (Ravi & Kumar, 2012)

2.7 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan merupakan salah satu karakteristik yang sangat penting dalam bidang manufaktur maupun dalam perancangan komponen mesin (Rochim, 2001). Kekasaran permukaan merupakan penyimpangan rata-rata aritmatika dari garis rata-rata profil (Sato dan Sugiarto, 1994). Kalpakjian (2001) menyatakan bahwa penyimpangan rata-rata aritmatika (R_a) merupakan jumlah rata-rata puncak tertinggi dan terendah dari setiap gelombang yang diukur pada panjang tertentu.

Penyimpangan rata-rata aritmatika (R_a) sebagai harga rata-rata dari ordinat-ordinat profil efektif garis rata-ratanya. Profil efektif merupakan garis bentuk dari potongan permukaan efektif oleh sebuah bidang yang telah ditentukan secara konvensional terhadap permukaan geometris ideal. Ilustrasi yang lebih jelas terhadap permukaan geometris, permukaan efektif, profil geometris, dan profil efektif ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Penyimpangan rata-rata aritmatika (Rochim, 2001)

Harga R_a ditentukan dari nilai-nilai ordinat ($y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$) yang dijumlahkan tanpa memperhitungkan tandanya. Secara umum, R_a dirumuskan sebagai berikut:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.7)$$

Harga R_a tersebut dapat didekati oleh persamaan:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2.8)$$

Atau

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (2.9)$$

Dengan:

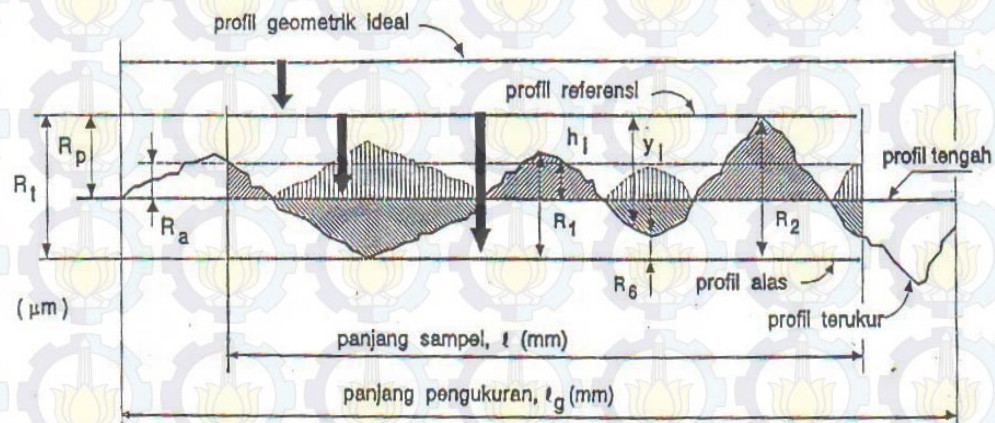
R_a = Nilai kekasaran aritmatika

Y_n = Tinggi atau dalam bagian-bagian profil hasil pengukuran jarum peraba

n = Frekuensi pengukuran

l = Panjang sampel yang telah ditentukan, yaitu panjang dari profil efektif yang diperlukan untuk menentukan kekasaran permukaan dari permukaan yang diteliti

Posisi R_a dan parameter kekasaran yang lain seperti bentuk profil, panjang sampel, dan panjang pengukuran yang dibaca oleh alat ukur kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Parameter dalam profil permukaan (Rochim, 2001)

Keterangan dari Gambar 2.14 adalah sebagai berikut (Rochim, 2001):

1. Profil geometris ideal (*Geometrically ideal profile*)
Profil ini merupakan profil dari geometris permukaan yang ideal yang tidak mungkin diperoleh karena banyaknya faktor yang mempengaruhi dalam proses pembuatannya. Bentuk dari profil geometris ideal ini dapat berupa garis lurus, lingkaran dan garis lengkung.
2. Profil referensi (*Reference profile*)
Profil ini digunakan sebagai dasar dalam menganalisis karakteristik dari suatu permukaan. Bentuk profil ini sama dengan bentuk profil geometris ideal, tetapi tepat menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur pada panjang sampel yang diambil dalam pengukuran.
3. Profil terukur (*Measured profile*)
Profil terukur adalah profil dari suatu permukaan yang diperoleh melalui proses pengukuran. Profil inilah yang dijadikan sebagai data untuk menganalisis karakteristik kekasaran permukaan produk pemesinan.
4. Profil dasar (*Root profile*)
Profil dasar adalah profil referensi yang digeserkan ke bawah hingga tepat pada titik paling rendah pada profil terukur.
5. Profil tengah (*Centre profile*)
Profil tengah adalah profil yang berada di tengah-tengah dengan posisi sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagian atas profil tengah sampai pada



profil terukur sama dengan jumlah luas bagian bawah profil tengah sampai pada profil terukur. Profil tengah ini sebenarnya merupakan profil referensi yang digeserkan ke bawah dengan arah tegak lurus terhadap profil geometris ideal sampai pada batas tertentu yang membagi luas penampang permukaan menjadi dua bagian yang sama yaitu atas dan bawah.

ISO (*International Organization for Standardization*) telah mengklasifikasikan nilai kekasaran rata-rata aritmetik (R_a) menjadi 12 tingkat kekasaran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1. Angka kekasaran permukaan ini bertujuan untuk menghindari kemungkinan terjadinya kesalahan dalam menginterpretasikan satuan harga kekasaran permukaan. Dengan adanya hal ini, kekasaran permukaan dapat dituliskan langsung dengan menyatakan harga R_a atau dengan menggunakan tingkat kekasaran ISO.

Tabel 2.1 Nilai Kekasaran Dan Tingkat Kekasaran (Rochim, 2001).

Kekasaran, R_a (μm)	Tingkat kekasaran	Panjang sampel (mm)
50	N12	8
25	N11	
12,5	N10	2,5
6,3	N9	
3,2	N8	0,8
1,6	N7	
0,8	N6	
0,4	N5	
0,2	N4	0,25
0,1	N3	
0,05	N2	
0,025	N1	0,08

Faktor-faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan (Rochim, 1993) dapat berasal dari:

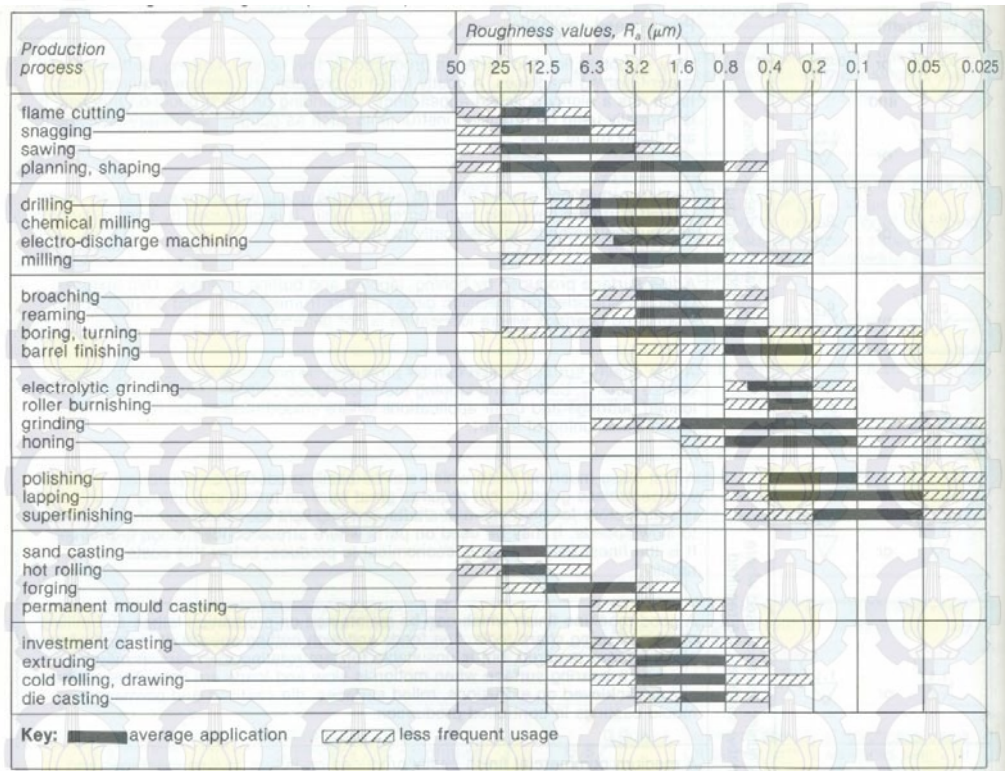
1. Variabel proses pemesinan, yaitu kecepatan potong, gerak makan dan kedalaman potong.
2. Geometri pahat, yaitu radius pojok dan sudut geram.
3. Sifat dari material benda kerja dan pahat.



4. Alat bantu dan cairan pendingin yang digunakan.
5. Jenis dan kualitas dari mesin yang digunakan.
6. Getaran antara pahat, benda kerja dan mesin.

Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa cara pengerjaan diperlihatkan oleh Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2 Nilai Kekasaran yang Dicapai oleh Beberapa Proses Pemesinan



Sumber: Cecil & Jay, 1985

Secara teoritik, kekasaran permukaan rata-rata aritmetik dapat dirumuskan (Kalpakjian, 2001) sebagai berikut:

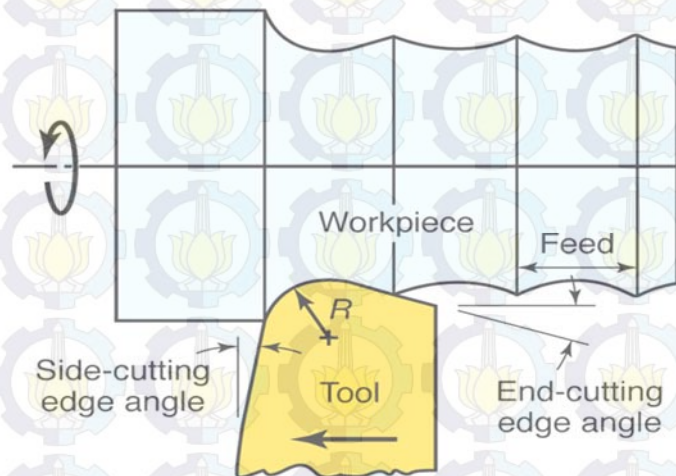
$$R_a = \frac{f^2}{32 R} \quad (2.10)$$

dengan:

- f = gerak makan (mm/put)
 R = radius pojok (mm)



Ilustrasi kekasaran permukaan secara teoritik yang diakibatkan oleh besarnya gerak makan dan radius pojok ditunjukkan pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Ilustrasi kekasaran permukaan secara teoritik (Kalpakjian, 2001)

2.8 Keausan Pahat

Keausan pahat merupakan faktor yang menentukan umur pahat. Umur pahat didefinisikan sebagai suatu periode waktu penggunaan pahat dimana rata-rata keausan tepi pahat telah mencapai 300 μm , atau maksimum keausan tepi yang terjadi adalah 600 μm (Rochim, 1993). Saat proses pemesinan berlangsung, pahat yang telah mencapai batas keausan yang telah ditetapkan akan menyebabkan (Rochim, 1993):

- Adanya kenaikan gaya potong.
- Terjadinya getaran (*chatter*).
- Penurunan kekasaran permukaan hasil pemesinan, dan/atau
- Perubahan dimensi/geometri produk.

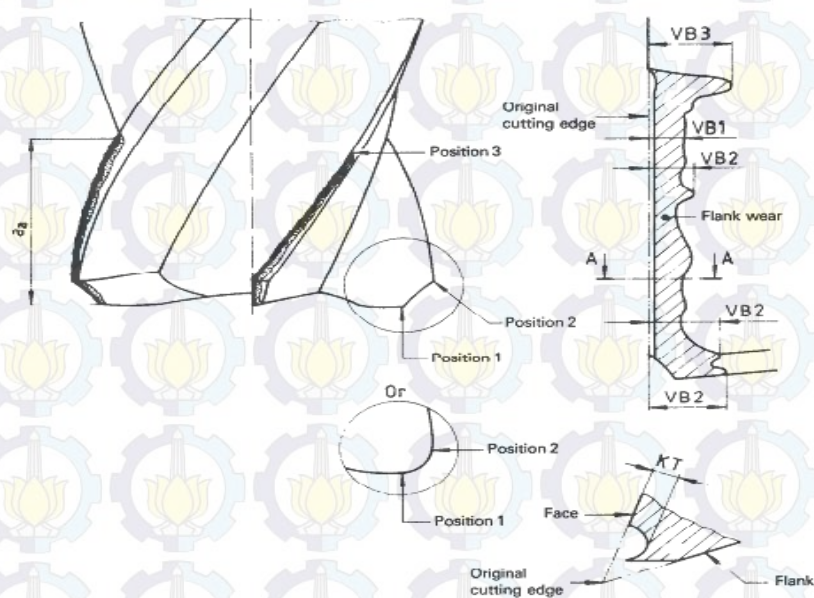
Fenomena kerusakan pahat *end mill* diilustrasikan pada Gambar 2.16 dengan penjelasan dari beberapa istilah yang terkait di dalamnya (ISO 8688-2, 1989).



1. *Flank wear* (VB), yaitu keausan pahat yang dinyatakan oleh jarak antara mata potong sebelum terjadi keausan sampai kegaris rata-rata bekas keausan pada bidang utama
2. *Uniform flank wear* (VB₁), yaitu keausan dari sisi tepi pahat yang biasanya mempunyai keausan yang konstan dan luas.
3. *Non-uniform wear* (VB₂), yaitu lebar keausan yang bervariasi dan tidak teratur
4. *Localized flank wear* (VB₃), yaitu keausan pahat terletak di sisi pahat, dan mempunyai bentuk keausan spesifik setempat yang berlebihan.

Rekomendasi nilai numerik untuk keausan tepi pahat (*flank wear*) adalah sebagai berikut (ISO 8688-2, 1989):

1. Keausan tepi seragam (*uniform wear*) besarnya rata-rata 0,3 mm untuk semua mata potong pahat *end mill* (*teeth*).
2. Keausan tepi setempat (*Localized wear*) besarnya 0,5 mm maksimum bila terjadi pada satu mata potong pahat *end mill*.



Gambar 2.16 Keausan *end mill* (ISO 8688-2, 1989)

Besarnya keausan pahat *end mill* dapat diukur dengan menggunakan *measurescope*. Dalam hal ini keausan tepi dapat diketahui dengan mengukur panjang VB (mm), yaitu jarak mata potong sebelum terjadi keausan (mata potong



didekatnya digunakan sebagai referensi) sampai kegaris rata-rata bekas keausan pada bidang utama (Rochim, 1993).

2.9 Laju Pengerjaan Bahan (LPB)

Laju pengerjaan bahan dapat didefinisikan sebagai besarnya volume bahan yang terbangun tiap satuan waktu (mm^3/min) dan dirumuskan sebagai berikut (Moshat dkk., 2010):

$$LPB = \frac{\text{Volume Material yang Terbangun}}{\text{Waktu Pengerjaan}} (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (2.11)$$

Keterangan:

$$\text{Volume material yang terbangun} = \frac{W_i - W_o}{\rho} (\text{mm}^3)$$

W_i = Berat material sebelum proses pemesinan (g)

W_o = Berat material setelah proses pemesinan (g)

ρ = Densitas material (g/mm^3)

2.10 Metode Taguchi

Metode Taguchi diperkenalkan oleh Dr. Genichi Taguchi pada tahun 1940 yang merupakan metodologi baru dalam bidang teknik dengan tujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses, menekan biaya penelitian dan *resources* seminimal mungkin. Metode Taguchi berupaya mencapai sasaran tersebut dengan menjadikan produk dan proses tidak sensitif terhadap berbagai faktor gangguan (*noise*), seperti: material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi-kondisi operasional. Metode Taguchi menjadikan produk dan proses memiliki sifat *robust* (kokoh, tangguh) terhadap faktor-faktor gangguan tersebut. Oleh karena itu metode Taguchi juga disebut sebagai *robust design*.

Metode Taguchi memperkenalkan pendekatan desain eksperimen yang dapat merancang suatu produk dan proses yang *robust* terhadap kondisi lingkungan, mengembangkan kualitas produk yang *robust* terhadap variasi komponen, dan meminimalkan variasi di sekitar target. Metode Taguchi memiliki beberapa



kelebihan bila dibandingkan dengan metode desain eksperimen lainnya. Kelebihan-kelebihan tersebut antara lain, adalah (Soejanto, 2009):

1. Lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan level faktor.
2. Dapat memperoleh proses yang menghasilkan produk secara konsisten dan *robust* terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol.
3. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum.

Namun demikian, metode Taguchi memiliki struktur rancangan yang sangat kompleks, sehingga pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian.

Desain eksperimen adalah proses mengevaluasi dua faktor atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu (Soejanto, 2009). Untuk mencapai hal tersebut secara efektif, faktor dan level faktor dibuat bervariasi kemudian hasil dari kombinasi pengujian tertentu diamati sehingga kumpulan hasil selengkapnya dapat dianalisis. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk menentukan faktor-faktor yang berpengaruh dan tindakan yang dapat membuat perbaikan lebih lanjut. Secara umum, desain eksperimen dengan menggunakan metode Taguchi dibagi menjadi tiga tahap utama yang mencakup semua pendekatan eksperimen, yaitu sebagai berikut:

1. Tahap Perencanaan

Tahap perencanaan merupakan tahap terpenting. Pada tahap ini seseorang peneliti dituntut untuk mempelajari eksperimen-eksperimen yang pernah dilakukan sebelumnya. Kecermatan pada tahap ini akan menghasilkan eksperimen yang memberikan informasi positif. Informasi positif terjadi apabila hasil eksperimen memberikan indikasi tentang faktor dan level yang mengarah pada peningkatan performansi produk.

Tahap perencanaan ini terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut (Soejanto, 2009):



a. Perumusan masalah

Langkah pertama adalah merumuskan masalah yang akan diselidiki dalam penelitian. Perumusan masalah harus jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam penelitian yang akan dilakukan.

b. Penentuan tujuan eksperimen

Tujuan yang melandasi penelitian harus dapat menjawab yang telah dinyatakan dalam perumusan masalah.

c. Penentuan variabel respon

Variabel respon adalah variabel yang perubahannya tergantung pada variabel-variabel lain.

d. Pengidentifikasian variabel proses

Variabel proses adalah variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel lain. Pada langkah ini akan dipilih variabel-variabel yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap respon yang bersangkutan. Dalam suatu eksperimen, tidak semua variabel yang diperkirakan mempengaruhi respon harus diselidiki. Dengan demikian, eksperimen dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.

e. Pemisahan variabel proses dan variabel gangguan

Variabel-variabel yang diamati dapat dibagi menjadi dua yaitu, variabel proses dan variabel gangguan. Dalam rancangan percobaan Taguchi, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua variabel tersebut berbeda. Variabel proses adalah variabel yang nilainya dapat dikendalikan, sedangkan variabel gangguan adalah variabel yang nilainya tidak dapat dikendalikan atau biasa disebut sebagai *factor noise*.

f. Penentuan jumlah dan nilai level variabel proses

Pemilihan jumlah level akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan eksperimen. Semakin banyak level yang diteliti maka hasil eksperimen yang diperoleh akan semakin akurat karena data yang diperoleh lebih banyak. Namun, banyaknya level akan meningkatkan jumlah pengamatan, sehingga biaya yang harus dikeluarkan akan semakin banyak untuk suatu penelitian.



g. Perhitungan Derajat Kebebasan

Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk menentukan jumlah eksperimen yang akan dilakukan untuk menyelidiki faktor yang diamati. Derajat kebebasan dari matriks orthogonal (v_{mo}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{mo} = \text{Jumlah penelitian} - 1 \quad (2.12)$$

Derajat kebebasan dari faktor dan level (v_{fl}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{fl} = \text{Jumlah level faktor} - 1 \quad (2.13)$$

h. Pemilihan Matriks Ortogonal

Penentuan matriks orthogonal digunakan untuk menentukan jumlah eksperimen yang akan dilakukan untuk menyelidiki faktor yang diamati. Matriks orthogonal yang tepat dapat ditentukan apabila jumlah derajat kebebasan eksperimen telah dihitung. Matriks ortogonal memiliki kemampuan untuk mengevaluasi sejumlah faktor dengan jumlah eksperimen yang minimum. Suatu matriks ortogonal dilambangkan dalam bentuk:

$$La(b^c) \quad (2.14)$$

Dengan:

L = rancangan bujur sangkar latin

a = banyak baris (penelitian)

b = banyak level

c = banyak kolom (faktor)

Matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ adalah salah satu contoh matriks ortogonal standar dengan beberapa level gabungan. Matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ ditunjukkan pada Tabel 2.3. Kolom pertama terdiri dari dua level, dan ketiga kolom yang lainnya terdiri dari tiga level.



Tabel 2.3 Matriks Ortogonal L_{18} ($2^1 \times 3^3$)

Kombinasi	Kolom variabel proses			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

2. Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan terdiri dari dua hal, yaitu penentuan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan eksperimen.

a. Jumlah Replikasi

Replikasi adalah pengulangan kembali perlakuan yang sama pada kondisi yang sama dalam sebuah percobaan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi, mengurangi tingkat kesalahan dan memperoleh harga taksiran dari kesalahan.

b. Randomisasi

Pengaruh faktor-faktor lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan selalu ada dalam sebuah eksperimen. Pengaruh tersebut dapat diperkecil dengan menyebarkan variabel-variabel tersebut selama



penelitian melalui randomisasi (pengacakan) urutan percobaan.

Randomisasi dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

- Menyebarkan pengaruh dari variabel-variabel yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit eksperimen
- Memberikan kesempatan yang sama pada semua unit eksperimen untuk menerima suatu perlakuan sehingga ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama.
- Mendapatkan hasil eksperimen yang bebas satu sama lain.

Jika replikasi bertujuan untuk memungkinkan dilakukannya uji signifikansi, maka randomisasi bertujuan untuk memberikan validasi terhadap uji signifikansi tersebut dengan menghilangkan sifat bias.

3. Tahap Analisis

Pada tahap ini, pengumpulan dan pengolahan data dilakukan. Selain itu, juga dilakukan perhitungan dan pengujian data statistik pada data hasil eksperimen.

a. Analisis Variansi (ANAVA)

Analisis variansi adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis data yang telah disusun dalam perencanaan penelitian secara statistika. Analisis ini merupakan teknik menganalisis dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Analisis variansi digunakan untuk membantu mengidentifikasi kontribusi faktor sehingga akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis variansi untuk suatu matriks orthogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Untuk analisis variansi dua arah adalah data penelitian yang terdiri dari dua faktor atau lebih dan dua level atau lebih. Tabel ANAVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (*degree of freedom*, *df*), jumlah kuadrat (*sum of square*, *SS*), kuadrat tengah (*mean of square*, *MS*), dan *F* hitung (F_{rasio} , F_0) seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4.



Tabel 2.4 Tabel Analisis Variansi (ANAVA)

Sumber variasi	<i>Sum of square</i> (SS)	<i>Degree of freedom</i> (df)	<i>Mean square</i> (MS)	F_{Ratio} (F_0)
Variabel proses A	$SS_A = nA \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$	$kA - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{df A}$	$\frac{MS_A}{MSE}$
Variabel proses B	$SS_B = nB \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{y})^2$	$kB - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{df B}$	$\frac{MS_B}{MSE}$
Residual	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B$	$df T - df A - df B$	$MSE = \frac{SSE}{df E}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$	$N - 1$		

Sumber: Ross, 2008

dengan:

k_A = banyaknya level pada variabel proses A

k_B = banyaknya level pada variabel proses B

n_A = banyaknya replikasi level variabel proses A

n_B = banyaknya replikasi level variabel proses B

\bar{y} = rata-rata total

N = jumlah total pengamatan

b. Uji F

Perbedaan perlakuan dan pengaruh faktor dalam suatu penelitian tidak dapat dibuktikan dengan hasil analisis variansi, namun pembuktian ini bisa dilakukan dengan uji hipotesa F. Uji hipotesa F dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan masing-masing faktor dan variansi eror. Variansi eror adalah variansi setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena faktor yang tidak dapat dikendalikan. Secara umum, hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk variabel proses yang tidak diambil secara random (*fixed*) adalah:

Hipotesa pengujian yang dilakukan adalah:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$



H_1 : sedikitnya ada satu pasangan μ yang tidak sama

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan tidak adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon yang dihasilkan pada perlakuan yang berbeda, sedangkan penolakan H_0 mengindikasikan adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon tersebut. Penolakan H_0 dilakukan jika $F_{hitung} > F_{\alpha}$. Kegagalan menolak H_0 juga dilakukan jika $P_{value} > \alpha$ atau taraf signifikansi. Taraf signifikansi juga dapat berlaku jika $F_{hitung} > 2$ atau $F(0.2) \leq F_{hitung} \leq F(0.1)$, yang artinya tidak sangat signifikan namun tidak diabaikan (Park, 1996).

c. Analisis Pemeriksaan Asumsi Residual

Residual didefinisikan sebagai selisih antara nilai pengamatan dan nilai dugaannya, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (2.15)$$

Dengan:

e_i = residual

Y_i = nilai pengamatan ke- i

\hat{Y}_i = nilai dugaan ke- i

Dalam analisis variansi terdapat asumsi bahwa residual bersifat bebas satu sama lain (independen), mempunyai mean nol dan varians (σ^2) yang konstan (identik), serta berdistribusi normal. Oleh karena itu dalam setiap pendugaan model harus dilakukan pemeriksaan asumsi tersebut apakah terpenuhi atau tidak. Pengujian asumsi residual dapat dilakukan sebagai berikut:

1. Pengujian Independen

Uji independen digunakan untuk menjamin bahwa pengamatan telah dilakukan secara acak, yang berarti antar pengamatan tidak ada korelasi (independen). Pemeriksaan asumsi ini dilakukan dengan menggunakan plot ACF (*auto correlation function*). Residual bersifat independen jika nilai korelasi berada dalam interval $\pm 2/\sqrt{n}$. Dengan n adalah jumlah pengamatan.

2. Pengujian Identik

Pengujian identik bertujuan untuk memenuhi apakah residual mempunyai penyebaran yang sama. Asumsi identik terpenuhi, jika datanya menyebar disekitar garis nol dan tidak menunjukkan pola-pola tertentu. Hal ini dilakukan dengan memeriksa plot e_i terhadap \hat{Y}_i (secara visual).



3. Pengujian Distribusi Normal

Probabilitas dari residual suatu respon, pada *software* Minitab dinyatakan sebagai *normal probability plot*. Selain itu, pengujian kenormalan residual juga menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov* dengan menggunakan hipotesa sebagai berikut:

H_0 : residual berdistribusi normal.

H_1 : residual tidak berdistribusi normal.

H_0 gagal ditolak apabila $P_{\text{value}} > \alpha$ yang mengindikasikan residual berdistribusi normal.

d. Rasio S/N

Rasio S/N digunakan untuk memilih nilai level faktor terbesar untuk mengoptimalkan karakteristik kualitas dari eksperimen. Perhitungan nilai rasio S/N berdasarkan jenis karakteristik kualitas dari masing-masing respon adalah sebagai berikut (Soejanto, 2009):

1. Semakin kecil semakin baik (*smaller-the-better*)

Karakteristik kualitas ini memiliki batas yang bernilai 0 dan non-negatif, sehingga nilai yang semakin kecil atau mendekati nol adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right] \quad (2.16)$$

2. Tertuju pada nilai tertentu (*nominal-is-best*)

Karakteristik kualitas ini memiliki nilai target tidak nol dan terbatas sehingga, nilai yang semakin mendekati target tersebut adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} \right] \quad (2.17)$$



3. Semakin besar semakin baik (*larger the better*)

Karakteristik kualitas ini memiliki rentang nilai tak terbatas dan non-negatif, sehingga nilai yang semakin besar adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n (1/y_i^2)}{n} \right] \quad (2.18)$$

2.11 Metode Taguchi-grey-fuzzy

Dalam metode Taguchi, optimasi hanya dapat dilakukan untuk satu respon saja. Untuk melakukan optimasi beberapa respon secara serentak digunakan gabungan dari metode Taguchi, *grey relational analysis* (GRA) dan logika fuzzy.

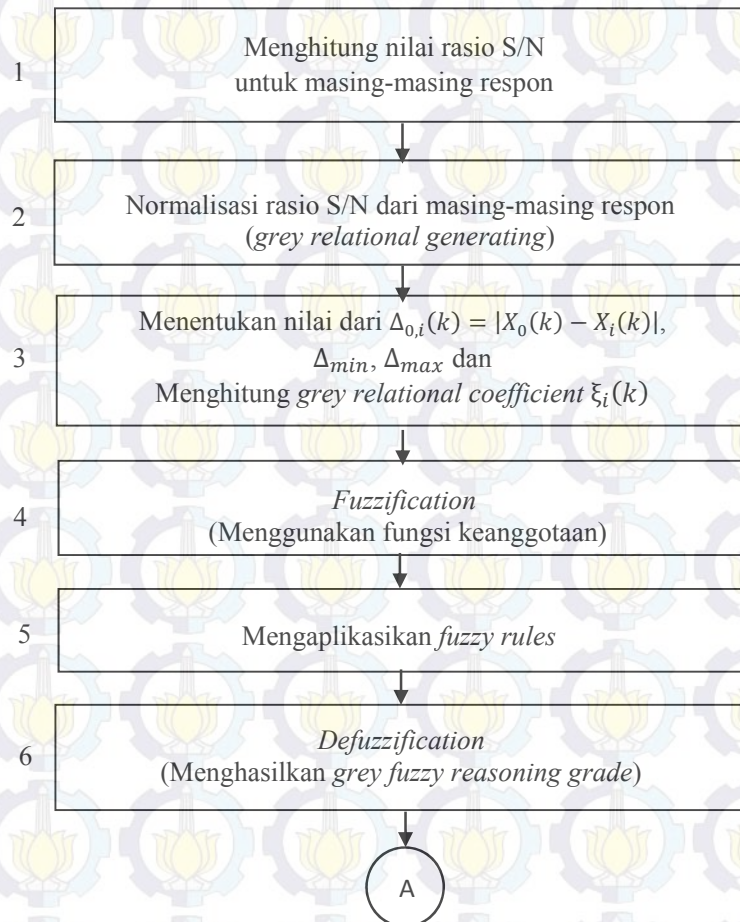
Metode GRA diawali dengan teori *grey system* yang dibuat oleh Dr. Julong Deng pada tahun 1982, yang merupakan dasar dari suatu metode baru yang difokuskan pada studi tentang permasalahan yang memiliki data dan informasi yang minimum. Metode ini digunakan untuk membangun model hubungan dan melakukan analisis hubungan antar respon dan parameter, serta sebagai dasar dalam melakukan prediksi maupun pengambilan keputusan. GRA merupakan salah satu metode yang dibangun berdasarkan teori *grey*. Pada dasarnya GRA digunakan dalam optimasi untuk mengubah beberapa respon menjadi satu respon.

Logika fuzzy pertama kali diformulasikan oleh Dr. Zadeh pada tahun 1965. Metode ini diformulasikan dalam upaya mencari nilai tengah antara nol dan satu. Dr. Zadeh melakukan modifikasi pada teori himpunan, dimana setiap anggotanya memiliki derajat keanggotaan yang selalu bernilai kontinyu antara nol sampai satu. Himpunan ini disebut sebagai himpunan kabur (*fuzzy set*).

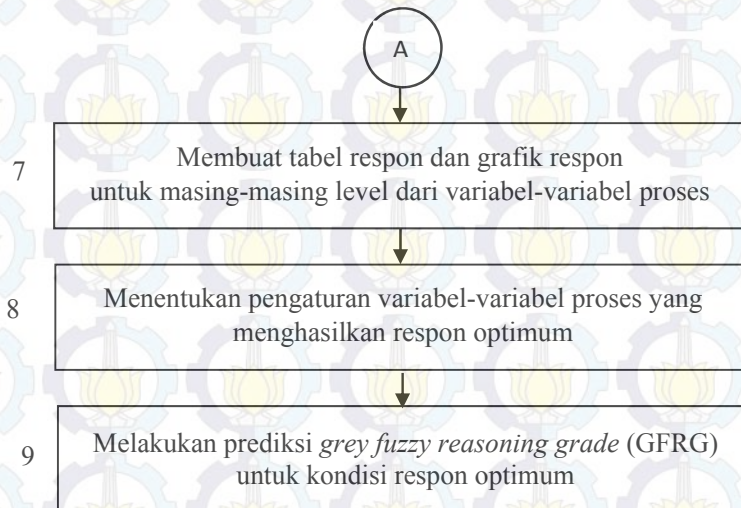
Logika fuzzy mempunyai kemampuan untuk memproses variabel respon yang bersifat kabur atau yang tidak dapat dideskripsikan secara pasti, misalnya tinggi, lambat, dan bising. Ketidakjelasan dalam menggambarkan suatu variabel respon dapat secara alami dimodelkan dengan menggunakan logika fuzzy. Dalam logika fuzzy, variabel respon yang bersifat kabur direpresentasikan sebagai sebuah himpunan yang anggotanya adalah suatu nilai tegas (*crisp*) dan derajat keanggotaan



(membership function). Langkah-langkah untuk proses optimasi dengan metode Taguchi-Grey-Fuzzy dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Langkah-langkah optimasi Taguchi-grey-fuzzy



Gambar 2.17 Langkah-langkah optimasi Taguchi-grey-fuzzy (Lanjutan)

Rincian dari langkah-langkah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Menghitung rasio S/N untuk masing-masing respon.

Perhitungan rasio S/N dilakukan berdasarkan karakteristik dari masing-masing respon sesuai dengan persamaan 2.16 sampai dengan persamaan 2.18.

2. Normalisasi data untuk masing-masing respon

Pada penelitian ini, normalisasi dilakukan pada rasio S/N di mana rasio S/N memiliki karakteristik semakin besar semakin baik. Nilai S/N rasio dinormalkan menjadi nilai yang besarnya antara 0 dan 1. Tabel 2.5 menunjukkan penempatan nilai respon untuk proses normalisasi.

Tabel 2.5 Penempatan Rasio S/N

	Rasio S/N 1	Rasio S/N 2		Rasio S/N _k
Kombinasi ₁	$X_1(1)$	$X_1(2)$...	$X_1(k)$
Kombinasi ₂	$X_2(1)$	$X_2(2)$...	$X_2(k)$
...
Kombinasi i	$X_i(1)$	$X_i(2)$...	$X_i(k)$

Cara yang digunakan untuk proses normalisasi sesuai dengan karakteristik respon yang meliputi semakin besar semakin baik (*larger the better*), semakin



kecil semakin baik (*smaller the better*) dan tertuju pada nilai tertentu (*nominal the best*). Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “semakin besar semakin baik” (Huang dan Liao, 2003) adalah:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.19)$$

Proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “semakin kecil semakin baik” menggunakan persamaan sebagai berikut (Huang dan Liao, 2003):

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.20)$$

Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “terturu pada nilai tertentu” adalah (Huang dan Liao, 2003):

$$X_i^*(k) = 1 - \frac{|X_i(k) - X_{ob}(k)|}{\max_{\forall k} X_i(k) - X_{ob}(k)} \quad (2.21)$$

dengan:

$$\max_{\forall k} X_i(k) = \text{nilai terbesar dari } X_i(k)$$

$$\min_{\forall k} X_i(k) = \text{nilai terkecil dari } X_i(k)$$

$$X_{ob}(k) = \text{nilai target dari } X_i(k)$$

3. Menentukan *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$

Deviation sequence $\Delta_{0,i}(k)$ adalah selisih absolut antara nilai maksimum hasil normalisasi yang besarnya satu dengan data yang telah dinormalisasi. Penentuan *deviation sequence* dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Datta dan Mahapatra, 2010):

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_0(k) - X_i^*(k)| \quad (2.22)$$



4. Menentukan *grey relational coefficient* $\xi_i(k)$

Grey relational coefficient menunjukkan hubungan antara kondisi yang ideal (terbaik) dengan kondisi aktual dari respon yang dinormalisasi. *Grey relational coefficient* (GRC) akan bernilai satu apabila respon yang dinormalisasikan tersebut cocok dengan kondisi yang ideal. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai tersebut adalah (Datta dan Mahapatra, 2010):

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{max}} \quad (2.23)$$

dengan:

$$\Delta_{min} = \min_i \min_k \Delta_{0,i}(k)$$

$$\Delta_{max} = \max_i \max_k \Delta_{0,i}(k)$$

ζ = *distinguish coefficient*.

Pada umumnya nilai *distinguish coefficient* diatur berdasarkan kebutuhan dan besarnya antara 0 dan 1. Nilai *distinguish coefficient* yang digunakan pada umumnya adalah 0,5 (Tosun, 2006). Nilai *grey relational coefficient* yang tinggi menunjukkan bahwa hasil eksperimen memiliki hubungan yang dekat dengan nilai normalisasi yang terbaik pada respon tersebut.

5. Tahap *fuzzification*

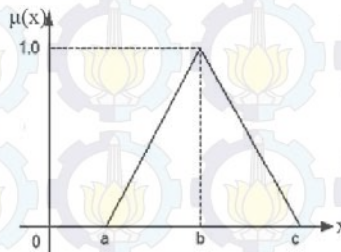
Fuzzification merupakan proses pengubahan nilai awal, yaitu *grey relation coefficient* menjadi bilangan *fuzzy* dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang digunakan untuk menunjukkan pemetaan titik-titik *input* data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan). Interval nilai keanggotaan yang digunakan adalah antara 0 sampai 1. Pendekatan fungsi digunakan sebagai salah satu cara untuk mendapatkan nilai keanggotaan. Ada dua fungsi keanggotaan yang umum digunakan dalam penelitian, yaitu fungsi keanggotaan kurva segitiga dan kurva trapesium.



Fungsi keanggotaan kurva segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis linear, yaitu fungsi linier naik dan fungsi linier turun. Fungsi keanggotaan kurva segitiga adalah sebagai berikut (Kusumadewi, 2010):

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}; & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases} \quad (2.24)$$

Fungsi keanggotaan kurva segitiga ditunjukkan pada Gambar 2.18.

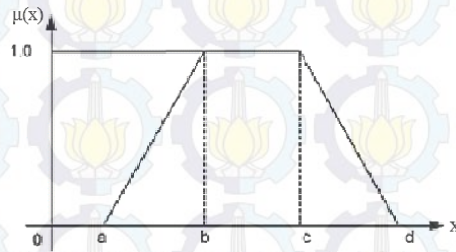


Gambar 2.18 Fungsi keanggotaan kurva segitiga

Fungsi keanggotaan kurva trapesium pada dasarnya seperti bentuk segitiga, hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan sama, yaitu bernilai satu. Fungsi keanggotaan kurva trapesium adalah sebagai berikut (Kusumadewi, 2010):

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{c-d}; & x \geq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (2.25)$$

Bentuk fungsi keanggotaan kurva trapesium ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Fungsi keanggotaan kurva trapesium

6. Mengaplikasikan *fuzzy rules*

Fuzzy rules merupakan aturan yang menjelaskan mengenai hubungan antara *output* dan nilai-nilai tertentu pada masing-masing variabel *input*. Selain itu, *fuzzy rules* juga merupakan alat penarik kesimpulan akan menghasilkan nilai *fuzzy* berdasarkan logika *fuzzy*. Biasanya *fuzzy rules* dibuat berdasarkan pengelompokkan dengan bentuk batasan aturan *if-then* (jika-maka), contohnya sebagai berikut:

Aturan ke-1: Jika x_1 adalah A_1 , x_2 adalah B_1 , ..., dan x_k adalah Y_1 maka y adalah Z_1 ,

Aturan ke-2: Jika x_1 adalah A_2 , x_2 adalah B_2 , ..., dan x_k adalah Y_2 maka y adalah Z_2 ,

Aturan -n : Jika x_1 adalah A_n , x_2 adalah B_n , ..., dan x_k adalah Y_n maka y adalah Z_n ,

Derajat keragaman dari keanggotaan dari himpunan *fuzzy* akan dihitung berdasarkan nilai dari x_1 , x_2 , hingga x_k , dan y , sedangkan A , B hingga Y adalah himpunan *fuzzy* yang ditetapkan berdasarkan fungsi keanggotaan. Sebuah *output fuzzy* multi respon dihasilkan dengan menggunakan operasi *max-min inference* dan *fuzzy rule*. Apabila x_1 , x_2 , hingga x_3 adalah GRC, maka fungsi keanggotaan dari y yang merupakan *output* multi respon dapat dirumuskan sebagai berikut (Lin dan Lin, 2002):

$$\mu_{Z_0}(y) = ((\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{B_1}(x_2) \wedge \mu_{C_1}(x_3) \wedge \mu_{Z_1}(x_3)) \vee \dots \vee ((\mu_{A_k}(x_1) \wedge \mu_{B_k}(x_2) \wedge \mu_{C_k}(x_3) \wedge \mu_{Z_n}(x_3))) \quad (2.26)$$



Dimana secara berturut-turut \wedge dan \vee adalah operasi minimum dan maksimum.

7. Defuzzification

Defuzzification merupakan pengubahan nilai *fuzzy* menjadi *grey fuzzy reasoning grade* (GFRG) dengan cara melakukan pemetaan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas (*crisp*). Metode yang paling sering digunakan pada proses *defuzzification* adalah metode *centroid*. Pada metode ini, *defuzzification* yang dilakukan dengan cara mengambil titik pusat (z^*) daerah *fuzzy*. Metode ini dapat dirumuskan sebagai berikut berikut (Lin dan Lin, 2002):

$$Z^* = \frac{\int_z z \mu(z) dz}{\int_z \mu(z) dz} \quad (2.27)$$

atau dapat dirumuskan (Kusumadewi dan Purnomo, 2010) sebagai berikut:

$$Z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \quad (2.28)$$

dengan:

z^* = nilai GFRG

z_j = nilai domain ke-j

$\mu(z_j)$ = derajat keanggotaan

8. Menentukan kombinasi variabel proses untuk respon optimum

Semakin besar nilai GFRG, semakin baik pula respon dari proses pada kombinasi variabel-variabel tersebut. Penentuan kombinasi variabel terbaik diawali dengan membuat tabel respon dari GFRG seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Tabel Respon *Grey Fuzzy Reasoning Grade*

	Level 1	Level 2	Level j
Variabel 1	Y_{11}	-	Y_{1j}
Variabel 2	Y_{21}	-	Y_{2j}
-			
Variabel i	Y_{i1}	-	Y_{ij}
Max-Min	Q_1		Q_j



Y_{ij} adalah rata-rata nilai GFRG yang dikelompokkan berdasarkan variabel i dan level j . Grafik respon dibuat berdasarkan tabel respon untuk memudahkan pemilihan level dari variabel yang menghasilkan respon yang optimal.

9. Memprediksi nilai GFRG hasil optimasi

Nilai prediksi GFRG berdasarkan kombinasi level variabel proses untuk menghasilkan respon yang optimal dapat dihitung menggunakan rumus (Lin dan Lin, 2002):

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \quad (2.29)$$

dengan:

γ_m = nilai rata-rata dari keseluruhan GFRG

$\bar{\gamma}_i$ = rata-rata GFRG pada level optimal

q = jumlah variabel proses yang mempengaruhi respon secara signifikan

2.12 Interpretasi Hasil Percobaan

Interpretasi yang dilakukan pada hasil percobaan dengan menggunakan kombinasi metode Taguchi dan logika *fuzzy* adalah sebagai berikut:

1. Persen Kontribusi

Persen kontribusi merupakan porsi masing-masing variabel proses dan/atau interaksi variabel proses yang signifikan terhadap total variansi yang diamati. Persen kontribusi merupakan fungsi dari jumlah kuadrat dari masing-masing variabel proses yang signifikan. Persen kontribusi menunjukkan kekuatan relatif dari suatu variabel untuk mereduksi variasi. Persen kontribusi dihitung untuk variabel proses, interaksi variabel proses, dan *error*. Jika persen kontribusi *error* kurang dari 15%, maka berarti tidak ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan. Tetapi jika persen kontribusi *error* lebih dari 15% mengindikasikan ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan sehingga *error* yang terjadi terlalu besar. Persen kontribusi suatu variabel proses dirumuskan dengan menggunakan persamaan (Ross, 2008):



$$\rho = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100\% \quad (2.30)$$

dengan:

$$SS'_A = SS_A - df_A \cdot MS_E \quad (2.31)$$

SS_A = jumlah kuadrat dari variabel proses A

SS_T = jumlah kuadrat total

df_A = derajat kebebasan dari variabel proses A

MS_E = rata-rata kuadrat dari *error*

2. Interval Keyakinan

(a) Interval keyakinan untuk kondisi optimum prediksi

Untuk menghitung interval keyakinan untuk kondisi optimum prediksi menggunakan rumus (Ross, 2008):

$$CI_p = \sqrt{\frac{F_{(\alpha,1,df_E)} MS_E}{n_{eff}}} \quad (2.32)$$

$$\hat{\mu} - CI_p \leq \hat{\mu} \leq \hat{\mu} + CI_p \quad (2.33)$$

dengan:

$$n_{eff} = \text{banyaknya pengamatan efektif} \quad (2.34)$$

$$= \frac{\text{total percobaan}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan variabel untuk menduga rata-rata}}$$

$\hat{\mu}$ = rata-rata GFRG prediksi pada kondisi optimum

(b) Interval keyakinan untuk memprediksi percobaan konfirmasi

Untuk menghitung interval keyakinan untuk memprediksi percobaan konfirmasi menggunakan rumus (Ross, 2008):

$$CI_{CE} = \sqrt{F_{(\alpha,1,df_E)} MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (2.35)$$

dengan:

r = jumlah sampel dalam percobaan konfirmasi.



$$\hat{\mu} - CI_{CE} \leq \mu \leq \hat{\mu} + CI_{CE} \quad (2.36)$$

3. Percobaan Konfirmasi

Pada penelitian tentang optimasi proses langkah terakhir yang harus dilakukan adalah percobaan konfirmasi. Percobaan ini dilaksanakan dengan melakukan percobaan yang menggunakan kombinasi level variabel proses hasil optimasi. Tujuan dari percobaan konfirmasi adalah untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diambil pada tahap analisa. Percobaan konfirmasi dilakukan untuk mencocokkan hasil respon prediksi dengan hasil respon secara aktual (Ross, 2008). Selain itu, percobaan konfirmasi dilakukan untuk membandingkan respon pada kondisi awal dengan respon setelah dilakukan proses optimasi. Langkah-langkah dalam percobaan konfirmasi dapat diuraikan sebagai berikut:

- a. Menentukan kombinasi variabel proses dan level-levelnya untuk menghasilkan respon optimum.
- b. Melakukan percobaan berdasarkan kombinasi untuk respon optimum.
- c. Membandingkan rata-rata hasil percobaan konfirmasi dengan rata-rata hasil prediksi.

Percobaan konfirmasi dinyatakan berhasil bila:

- a. Rata-rata hasil percobaan konfirmasi mendekati rata-rata hasil prediksi.
- b. Rata-rata respon hasil percobaan konfirmasi berada didalam interval keyakinan $(1-\alpha)$ 100% dari rata-rata respon hasil prediksi.



[Halaman ini sengaja dikosongkan]

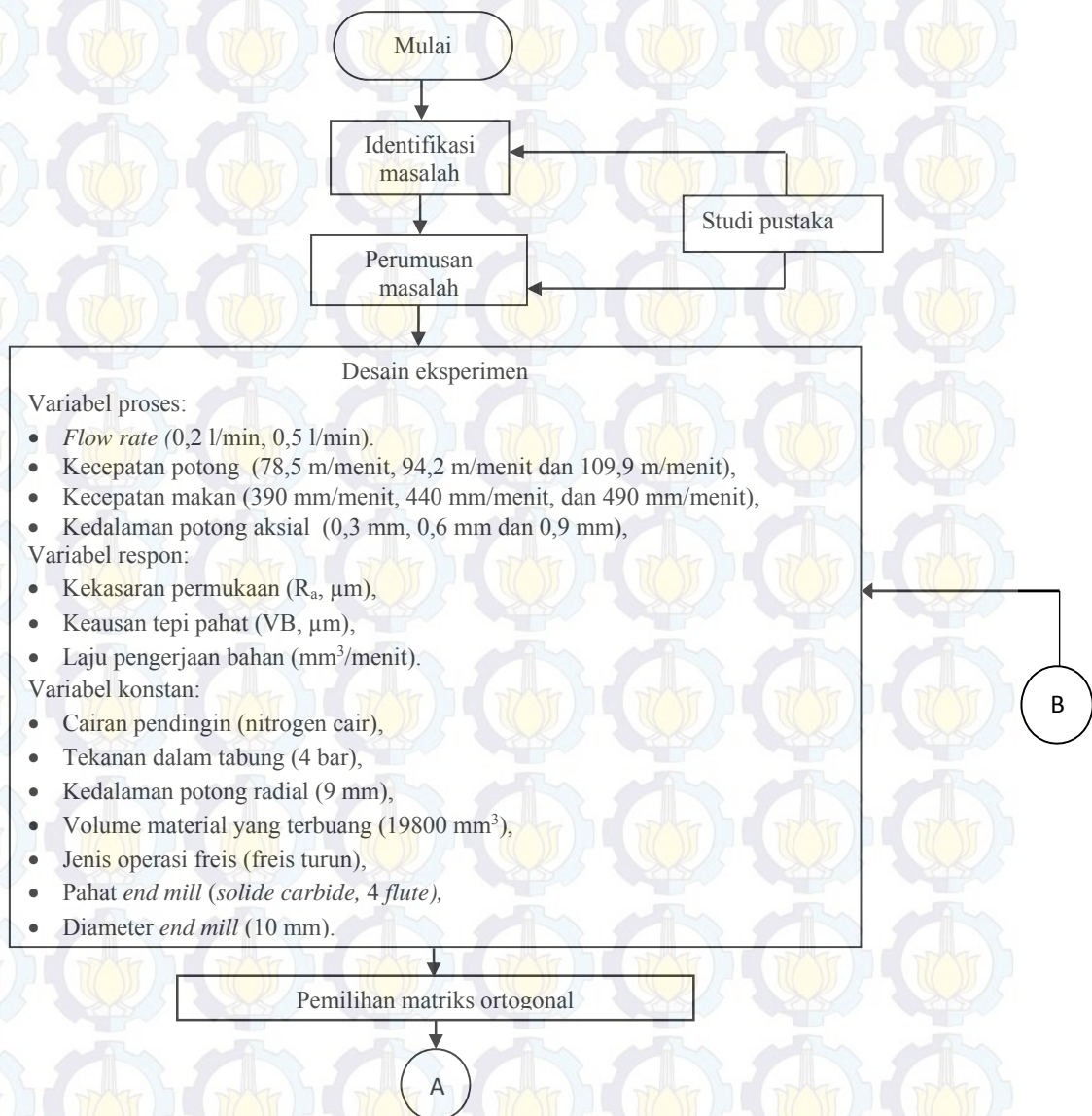


BAB III

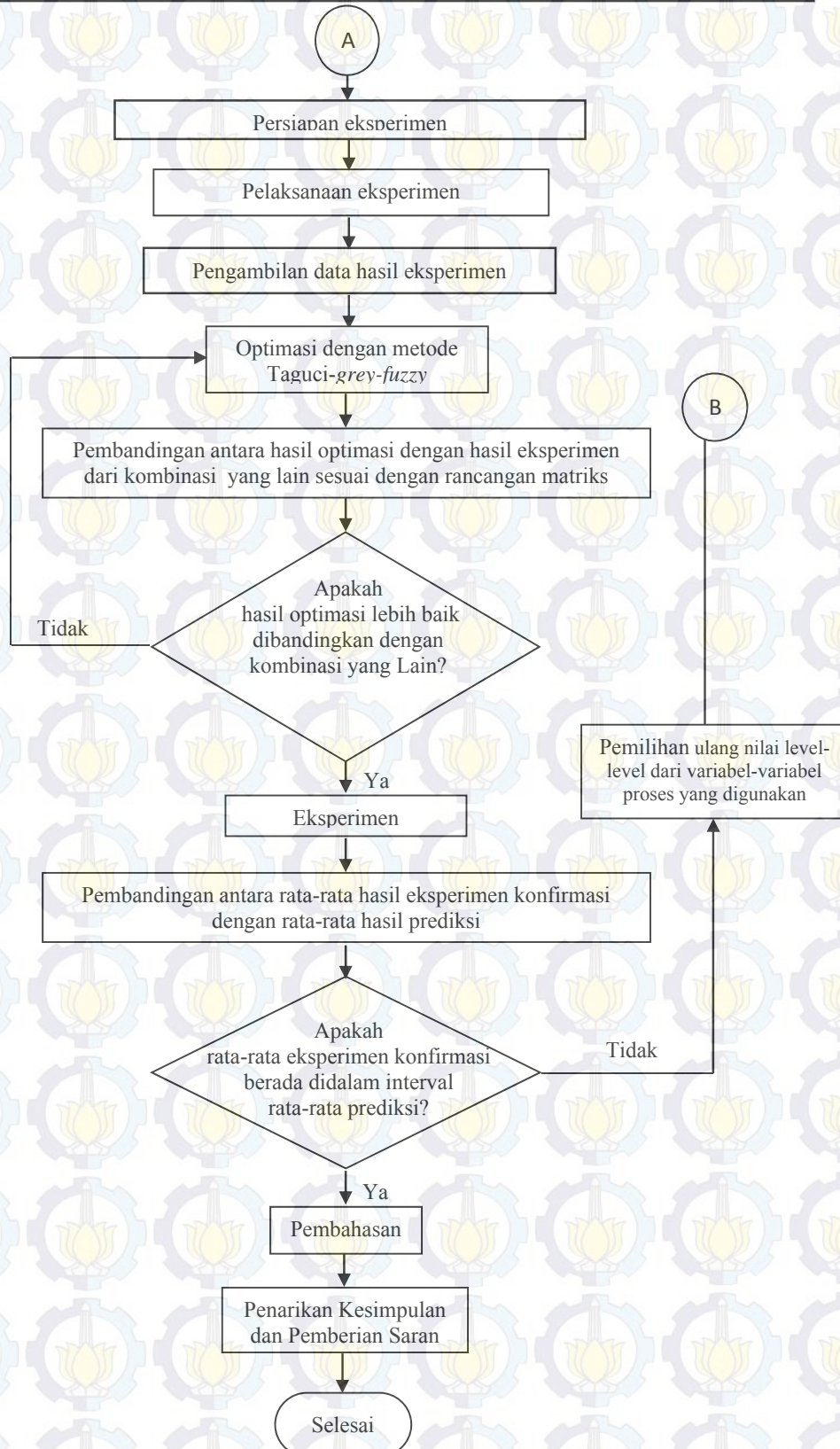
METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ditetapkan di awal supaya penelitian yang akan dilakukan dapat terarah dan mengena pada tujuan penelitian. Tahapan penelitian yang dilakukan mengikuti diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian (lanjutan)



3.2 Variabel Penelitian

Variabel-variabel penelitian yang digunakan untuk mendapatkan data eksperimen adalah sebagai berikut:

1. Variabel proses

Variabel proses merupakan variabel yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan berdasarkan pertimbangan tertentu. Variabel proses yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. *Flow rate* cairan pendingin (FL, l/menit),
- b. Kecepatan potong (V_c , m/menit),
- c. Kecepatan makan (V_f , mm/menit),
- d. Kedalaman potong aksial (A_a , mm),

2. Variabel respon

Variabel respon merupakan variabel yang nilainya akan dipengaruhi oleh variabel proses dan perlakuan yang diberikan. Variabel respon yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Kekasaran permukaan (R_a , μm),
- b. Keausan tepi pahat (VB, mm),
- c. Laju pengerjaan bahan (mm^3/menit).

3. Variabel konstan

Variabel konstan merupakan variabel yang nilainya dijaga selalu konstan agar tidak berubah selama percobaan, sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian secara signifikan. Variabel konstan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Cairan pendingin,
- b. Tekanan dalam tabung (bar),
- c. Kedalaman potong radial (A_r , mm),
- d. Volume material yang terbuang (mm^3),
- e. Jenis operasi freis (freis turun),
- f. Pahat *end mill* (solide carbide, 4 flute),
- g. Diameter pahat end mill (mm).



3.3 Karakteristik Respon Optimal

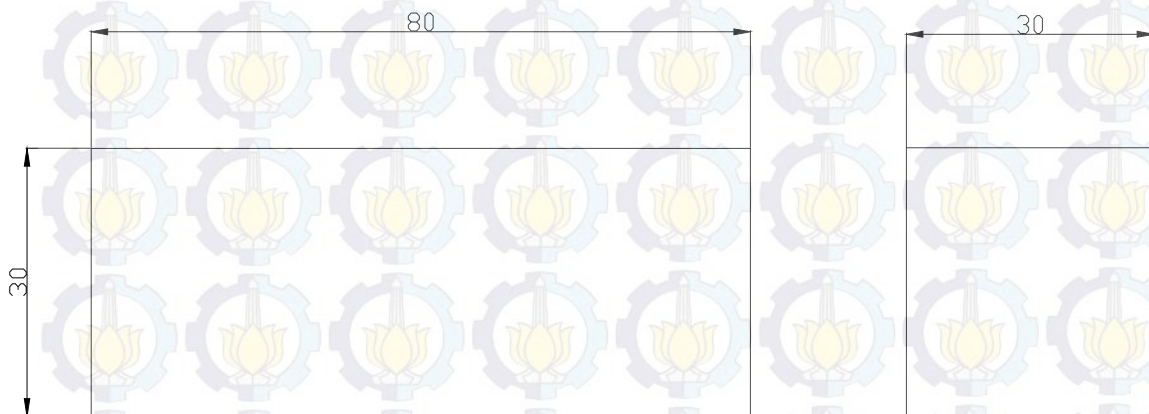
Karakteristik respon optimal yang digunakan pada penelitian ini adalah semakin kecil semakin baik (*smaller is better*) dan semakin besar semakin baik (*larger is better*). Karakteristik semakin kecil semakin baik digunakan untuk respon kekasaran permukaan dan keausan pahat, sedangkan laju pengerjaan material memiliki karakteristik semakin besar semakin baik.

3.4 Bahan dan Peralatan

Bahan dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Benda Kerja

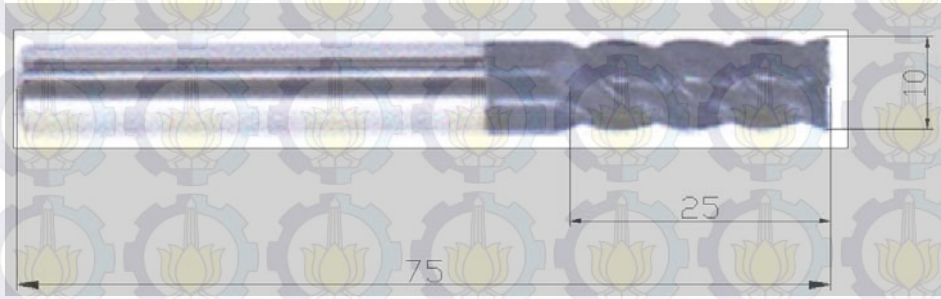
Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja perkakas ASSAB XW-42 dengan dimensi (30 x 30 x 80) mm dan kekerasan 45 HRC seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Dimensi benda kerja

2. Pahat

Pahat yang digunakan dalam penelitian ini adalah pahat *end mill solid carbide* dengan empat mata potong seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Diameter pahat *end mill* yang digunakan pada penelitian ini adalah 10 mm dengan *overall length* 75 mm.



Gambar 3.3 Pahat *end mill*

3. Mesin Freis CNC

Penelitian ini menggunakan mesin freis CNC seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Merk : YCM
- Negara Pembuat : Taiwan
- Model : MV 66A
- Panjang gerak sumbu X : 660 mm
- Panjang gerak sumbu Y : 508 mm
- Panjang gerak sumbu Z : 559 mm
- Putaran spindle : 8.000 rpm

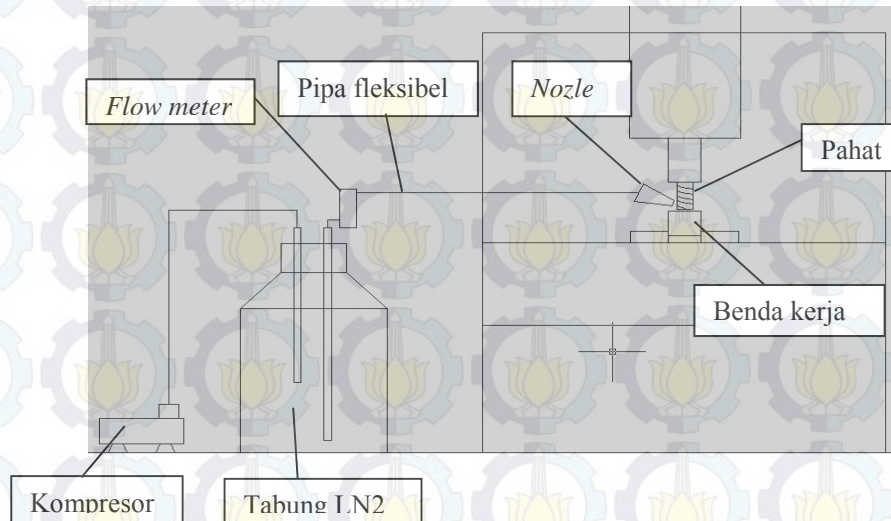


Gambar 3.4 Mesin CNC YCM MV 66A



4. Instalasi Pendingin Nitrogen Cair

Instalasi peralatan pendingin nitrogen cair yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Skema instalasi peralatan pendingin nitrogen cair

5. Measurescope

Panjang keausan tepi pahat (VB) pada penelitian ini diukur dengan menggunakan Nikon *measurescope* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6. Alat ukur ini memiliki kecermatan $1\ \mu\text{m}$ ($0,001\ \text{mm}$) dengan panjang maksimum yang dapat diukur adalah sebesar 5 mm.



Gambar 3.6 Nikon *measurescope*



6. Surface Roughness Tester

Kekasaran permukaan pada penelitian ini diukur dengan menggunakan Mitutoyo *surf test* SJ 310 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7. Alat ini memiliki kecermatan sebesar 0,1 μm .



Gambar 3.7 Mitutoyo *surf test* SJ 310

7. Stopwatch

Jenis *stopwatch* Accusplit Pro Survivor A601-X yang digunakan pada penelitian ini, ditunjukkan pada Gambar 3.8 dan digunakan untuk mengukur waktu proses pemesinan.



Gambar 3.8 Stopwatch

8. Peralatan bantu

a. Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi spesimen uji. Jangka sorong yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.9 dan mempunyai kecermatan sebesar 0,05 mm.



Gambar 3.9 Jangka sorong

b. Meja rata

Meja rata seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.10 digunakan sebagai alat bantu pada saat melakukan pengukuran kekasaran permukaan. Meja rata digunakan sebagai tempat untuk meletakkan *surface roughness tester* dan spesimen uji.



Gambar 3.10 Meja rata

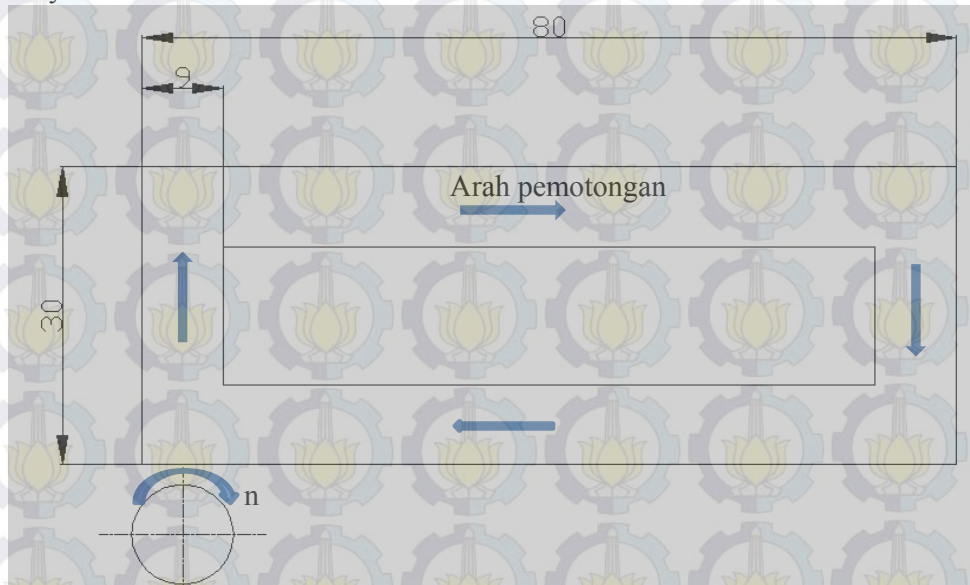
3.5 Rancangan Percobaan

3.5.1 Pemilihan Level dari Variabel Bebas

Proses *end milling* yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan model pengerjaan *side milling* seperti ditunjukkan pada gambar 3.11. Jenis pahat dan seting variabel proses yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada rekomendasi dari pemasok pahat untuk pengerjaan material ASSAB XW-42. Selain



itu, penentuan seting variabel proses juga didasarkan pada penelitian-penelitian sebelumnya.



Gambar 3.11 Skema proses pemotongan

3.5.2 Pemilihan Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal yang akan digunakan harus memiliki derajat kebebasan yang sama atau lebih besar daripada total derajat kebebasan faktor dan level yang telah ditetapkan. Jenis variabel proses, jumlah level dan nilai dari variabel proses yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variabel Proses Penelitian

Variabel Proses	Level	Nilai Variabel		
Flow rate cairan pendingin (l/min)	2	0,2	0,5	-
Kecepatan potong (V_c , m/menit)	3	78,5	94,2	109,9
Kecepatan makan (V_f , mm/menit)	3	390	440	490
Kedalaman potong aksial (A_a , mm)	3	0,3	0,6	0,9

Berdasarkan banyaknya variabel proses dan jumlah levelnya yang ditunjukkan pada Tabel 3.1, dilakukan perhitungan derajat kebebasan untuk menentukan matriks ortogonal yang digunakan. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 3.2.



Tabel 3.2 Total Derajat Kebebasan Variabel Bebas dan Levelnya

No	Variabel Bebas	Jumlah Level (k)	$df (k-1)$
1	Flow rate cairan pendingin	2	1
2	Kecepatan potong (V_c , m/menit)	3	2
3	Kecepatan makan (V_f , mm/menit)	3	2
4	Kedalaman potong aksial (A_a , mm)	3	2
Total derajat kebebasan			7

Tabel 3.2 menunjukkan bahwa total derajat kebebasan untuk rancangan eksperimen ini adalah tujuh dengan level campuran, matrik ortogonal yang akan digunakan harus lebih besar atau sama dengan tujuh. Oleh karena itu, sesuai dengan pilihan yang tersedia, matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ memenuhi syarat untuk dijadikan sebagai rancangan percobaan.

Rancangan percobaan untuk penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut ini.

Tabel 3.3 Matriks Ortogonal L_{18}

No	Parameter Pemesinan			
	Flow Rate (l/min)	Kecepatan Potong (m/min)	Kecepatan Makan (mm/min)	Kedalaman Potong (mm)
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

Sumber: Software Minitab



Pengambilan data eksperimen dilakukan secara acak dengan mengacu pada rancangan eksperimen pada Tabel 3.3. Pengacakan ini dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* statistik. Untuk mengatasi faktor gangguan (*noise*) yang terjadi selama proses pemotongan berlangsung, maka masing-masing kombinasi variabel proses akan direplikasi sebanyak dua kali.

Susunan penempatan data yang diperoleh berdasarkan hasil eksperimen ditunjukkan seperti Tabel 3.4. Data tersebut disusun sesuai dengan kombinasi variabel proses yang sama.

Tabel 3.4 Tampilan Data Hasil Eksperimen

Seting faktor, kombinasi ke-	Kekasaran Permukaan (μm)	Kearsan Tepi Pahat (mm)	Laju Pengerjaan Bahan (mm^3/min)
1	Y ₁₁₁	Y ₁₂₁	Y ₁₃₁
	Y ₁₁₂	Y ₁₂₂	Y ₁₃₂
2	Y ₂₁₁	Y ₂₂₁	Y ₂₃₁
	Y ₂₁₂	Y ₂₂₂	Y ₂₃₂
3	Y ₃₁₁	Y ₃₂₁	Y ₃₃₁
	Y ₃₁₂	Y ₃₂₂	Y ₃₃₂
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
18	Y ₁₈₁₁	Y ₁₈₂₁	Y ₁₈₃₁
	Y ₁₈₁₂	Y ₁₈₂₂	Y ₁₈₃₂

3.5.3 Prosedur Percobaan

Langkah-langkah eksperimen yang akan dilakukan pada penelitian ini untuk mendapatkan keausan pahat, kekasaran permukaan dan laju pengerjaan material adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen uji yang meliputi: penyesuaian ukuran, perataan, pembersihan spesimen dari kotoran-kotoran yang dapat mengganggu proses pemotongan dan penomoran spesimen.
2. Memasang spesimen baru pada ragum yang terdapat pada mesin freis dan melakukan pemeriksaan bahwa benda kerja berada pada posisi rata.
3. Memasang pahat *end mill* baru pada pemegang pisau (*tool holder*) di spindel mesin freis.



4. Menghidupkan mesin freis dan menyetting variabel-variabel proses yang telah ditetapkan sesuai dengan rancangan eksperimen.
5. Menyiapkan *stopwatch* untuk mengukur waktu proses.
6. Melaksanakan proses freis sesuai kombinasi faktor pada spesimen uji dan mencatat waktu proses.
7. Melepaskan benda kerja dari ragum setelah proses pemotongan selesai.
8. Mengulang langkah ketiga hingga ketujuh untuk spesimen dan kombinasi parameter berikutnya.

Langkah-langkah dari pengukuran kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan kalibrasi sensor pada *surface roughness tester*.
2. Meletakkan spesimen uji pada meja rata.
3. Menyentuhkan ujung sensor dari *surface roughness tester* pada spesimen uji. Sisi spesimen uji yang diukur kekasaran permukaannya adalah pada sisi akhir hasil pemotongan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.12.
4. Mengaktifkan *surface roughness tester* untuk melakukan proses pengukuran kekasaran permukaan sepanjang 0,8 mm. Angka kekasaran permukaan yang diamati adalah kekasaran aritmatika (R_a) yang dinyatakan dalam μm .
5. Mengulang langkah ketiga hingga keenam untuk mendapatkan hasil kekasaran permukaan pada spesimen uji yang sama. Hal ini dilakukan berulang hingga mendapatkan 3 data nilai R_a untuk tiap spesimen uji.

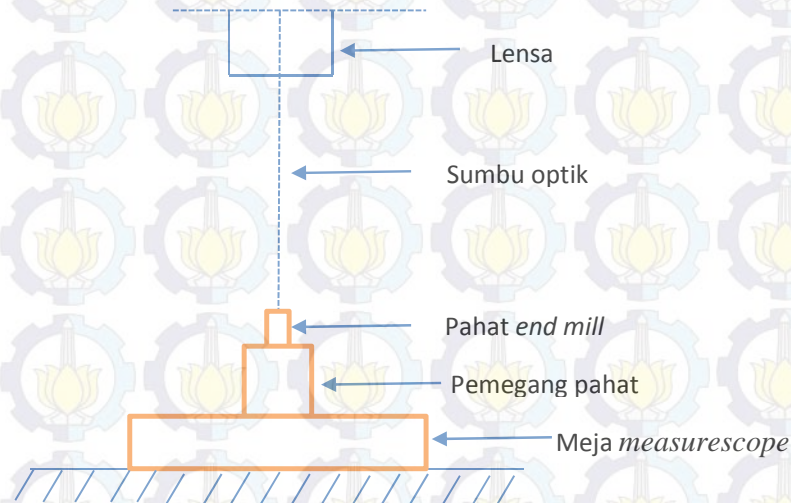


Gambar 3.12 Skema pengukuran kekasaran permukaan



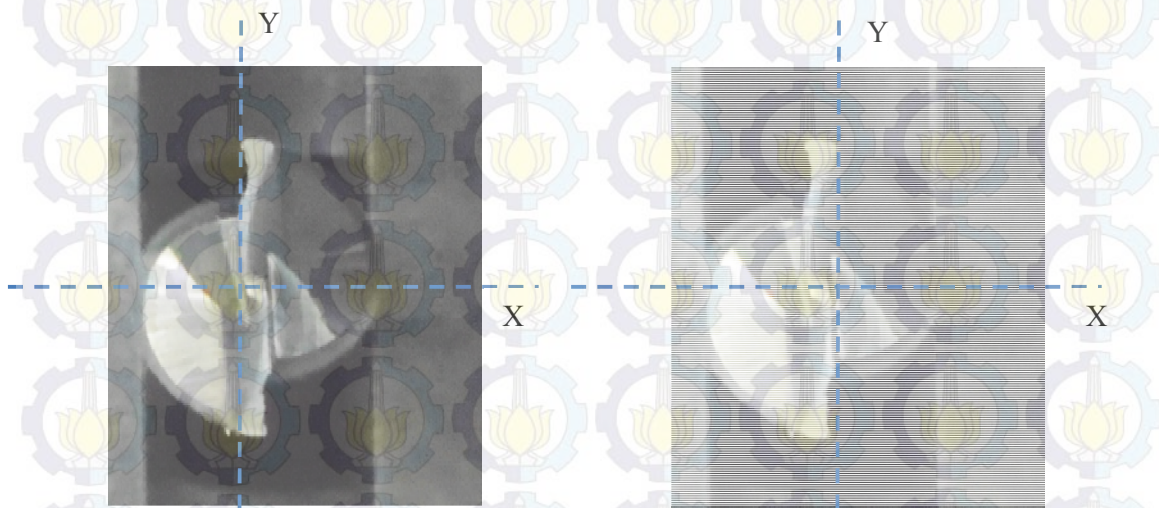
Langkah-langkah dari pengukuran keausan tepi pahat (VB) pada pahat *end mill* dengan menggunakan *measurescope* adalah sebagai berikut:

1. Meletakkan pahat potong *end mill* pada pemegang pahat dalam arah sejajar dengan sumbu optik seperti terlihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Posisi Pengukuran Keausan Pahat *End Mill*.

2. Mengukur keausan pahat *end mill* pada mata potong yang digunakan. Pengukuran keausan pahat dilakukan berdasarkan standar ISO 8688-2 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16. Pengukuran dilakukan dengan menempatkan tepi mata potong sebelum aus sejajar dan tepat berada pada salah satu sumbu referensi (dalam pengukuran ini dipergunakan sumbu Y) seperti terlihat pada Gambar 3.14. Selanjutnya, posisi pahat pada sumbu Y sebelum aus digeser sampai bekas keausan pada pahat sejajar dan berimpit pada sumbu Y. Nilai keausan pahat diperoleh dengan menghitung rata-rata dari nilai VB_1 , VB_2 dan VB_3 pada setiap mata potong.



Gambar 3.14 Skema proses pengukuran Keausan Pahat *End Mill*

Langkah-langkah dari perhitungan laju pengerjaan material adalah:

1. Mengukur waktu pemotongan dari spesimen.
2. Menghitung nilai laju pengerjaan material dengan persamaan 2.11.
3. Mengulang langkah pertama hingga kedua untuk spesimen dan kombinasi parameter berikutnya.



BAB 4

OPTIMASI MULTI RESPON DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Eksperimen

Eksperimen pada penelitian ini dilaksanakan berdasarkan rancangan percobaan Taguchi dengan matriks ortogonal L_{18} seperti ditunjukkan pada Tabel 3.3. Variabel-variabel proses *end milling* yang divariasikan pada eksperimen ini adalah *flow rate* cairan pendingin (FL), kecepatan potong (V_c), kecepatan makan (V_f) dan kedalaman potong aksial (A_a). Kekasaran permukaan (SR), keausan tepi pahat (VB) dan laju pengerjaan bahan (LPB) merupakan variabel respon yang didapatkan sebagai data. Urutan langkah-langkah pengambilan data hasil proses pemotongan adalah sebagai berikut:

a. Waktu pemotongan benda kerja

Waktu pemotongan benda kerja diukur dengan menggunakan *stopwatch* selama proses pemotongan berlangsung untuk setiap kombinasi percobaan.

b. Pengukuran kekasaran permukaan (SR)

Kekasaran permukaan benda kerja diukur dengan menggunakan *surface roughness tester*. Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pada sisi akhir hasil proses pemotongan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.12. Selanjutnya data tersebut dirata-rata sehingga didapatkan satu nilai kekasaran aritmatika (R_a) untuk setiap kombinasi. Hasil pengukuran kekasaran permukaan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 1.

c. Pengukuran keausan tepi pahat (VB)

Keausan tepi pahat diukur dengan menggunakan *measurescope* setelah proses pemotongan selesai. Dalam hal ini keausan tepi dapat diketahui dengan mengukur panjang VB (mm), yaitu jarak mata potong sebelum terjadi keausan (mata potong didekatnya digunakan sebagai referensi) sampai kegaris rata-rata bekas keausan pada bidang utama (Rochim, 1993). Posisi pengukuran keausan tepi pahat dapat dilihat pada gambar 2.16. Hasil pengukuran keausan tepi pahat selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran

2.



d. Perhitungan laju pengerjaan bahan (LPB)

Selama proses pemotongan, volume material yang terbangun dijaga konstan yaitu sebesar 19.800 mm^3 . Laju pengerjaan bahan dihitung dengan membagi volume material yang terbangun dengan waktu pemotongan seperti dinyatakan oleh persamaan 2.11. Contoh perhitungan laju pengerjaan bahan adalah sebagai berikut:

$$LPB = \frac{\text{Volume Material yang Terbangun}}{\text{Waktu Pengerjaan}} \text{ (mm}^3\text{/menit)}$$

Waktu untuk melakukan proses pemotongan pada kombinasi 1 dan replikasi 1 seperti ditunjukkan pada Lampiran 3 adalah 14,08 menit, maka:

$$\begin{aligned} LPB &= \frac{19.800 \text{ mm}^3}{14,08 \text{ menit}} \\ &= 1406,25 \text{ mm}^3\text{/menit.} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan laju pengerjaan bahan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 3.

Data hasil percobaan secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan selanjutnya diolah sesuai dengan langkah-langkah optimasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.

Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen

Komb.	Variabel <i>end milling</i>				SR		VB		LPB	
	FL	V _c	V _f	A _a	R1	R2	R1	R2	R1	R2
	(l/min)	(m/min)	(mm/min)	(mm)	(μm)	(μm)	(mm)	(mm)	(mm ³ /min)	(mm ³ /min)
1	1	1	1	1	0,855	0,884	0,021	0,022	1406,250	1442,623
2	1	1	2	2	0,947	0,943	0,022	0,023	3028,681	3014,846
3	1	1	3	3	1,425	1,428	0,026	0,022	4740,623	4750,100
4	1	2	1	1	0,644	0,675	0,019	0,020	1435,303	1442,623
5	1	2	2	2	0,542	0,597	0,020	0,021	2817,503	2807,515
6	1	2	3	3	0,859	0,867	0,021	0,022	4518,828	4638,813
7	1	3	1	2	0,660	0,738	0,018	0,017	2489,001	2485,096
8	1	3	2	3	0,653	0,744	0,019	0,018	4723,658	4695,652
9	1	3	3	1	0,774	0,810	0,017	0,021	1639,752	1619,632
10	2	1	1	3	0,564	0,574	0,017	0,023	3834,732	3720,639
11	2	1	2	1	0,656	0,571	0,016	0,018	1382,199	1421,903
12	2	1	3	2	0,724	0,722	0,020	0,023	3110,762	3098,592
13	2	2	1	2	0,515	0,521	0,018	0,019	2843,806	2901,099
14	2	2	2	3	0,548	0,523	0,018	0,021	4164,038	4211,273
15	2	2	3	1	0,573	0,685	0,020	0,020	1494,340	1514,340



Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen (lanjutan)

16	2	3	1	3	0,527	0,518	0,013	0,020	3737,024	3805,253
17	2	3	2	1	0,546	0,530	0,014	0,018	1299,293	1216,816
18	2	3	3	2	0,626	0,627	0,017	0,019	3093,750	3111,984

Sumber: Hasil pengukuran

4.2 Perhitungan Rasio S/N

Perhitungan nilai rasio S/N tergantung pada jenis karakteristik kualitas dari masing-masing respon. Respon kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat memiliki karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik. Laju pengerjaan bahan memiliki karakteristik kualitas semakin besar semakin baik. Perhitungan rasio S/N untuk karakteristik semakin kecil semakin baik dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.16 dan perhitungan rasio S/N untuk karakteristik semakin besar semakin baik dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.18.

Contoh perhitungan rasio S/N untuk respon kekasaran permukaan dengan karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik pada kombinasi pertama adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right] \\ &= -10 \log \left[\frac{(0,855^2) + (0,884^2)}{2} \right] \\ &= 1,2135 \end{aligned}$$

Rasio S/N untuk setiap karakteristik kualitas pada masing-masing respon kekasaran permukaan, keausan tepi pahat dan laju pengerjaan bahan untuk kombinasi lainnya ditunjukkan pada Tabel 4.2.



Tabel 4.2 Rasio S/N untuk Masing-Masing Respon

Komb.	Variabel proses				S/N SR	S/N VB	S/N LPB
	FL (l/min)	Vc (m/min)	Vf (mm/min)	Aa (mm)			
1	0,2	78,5	390	0,3	1,2135	33,4845	61,2751
2	0,2	78,5	440	0,6	0,4913	33,0200	67,8509
3	0,2	78,5	490	0,9	-3,0844	32,4864	71,7616
4	0,2	94,2	390	0,3	3,6133	34,0493	61,3926
5	0,2	94,2	440	0,6	4,8827	33,7646	67,2261
6	0,2	94,2	490	0,9	1,2780	33,2831	71,4142
7	0,2	109,9	390	0,6	3,0991	35,1357	66,1550
8	0,2	109,9	440	0,9	3,0983	34,4984	71,7074
9	0,2	109,9	490	0,3	2,0233	34,2276	62,4986
10	0,5	78,5	390	0,9	4,8999	33,9643	69,8246
11	0,5	78,5	440	0,3	4,2204	35,2961	61,1310
12	0,5	78,5	490	0,6	2,8132	33,4019	68,0850
13	0,5	94,2	390	0,6	5,7132	34,5731	67,3741
14	0,5	94,2	440	0,9	5,4170	34,1055	70,6618
15	0,5	94,2	490	0,3	3,9973	33,9794	61,7662
16	0,5	109,9	390	0,9	5,6379	35,4592	69,7414
17	0,5	109,9	440	0,3	5,3835	35,8503	60,3149
18	0,5	109,9	490	0,6	4,0616	34,8054	68,0657

4.3 Normalisasi Rasio S/N

Normalisasi adalah proses untuk mentransformasi nilai rasio S/N menjadi nilai yang besarnya antara nol sampai satu. Proses normalisasi dilakukan berdasarkan karakteristik kualitas respon rasio S/N. Karakteristik kualitas untuk respon rasio S/N adalah semakin besar semakin baik dan berlaku untuk masing-masing rasio S/N kekasaran permukaan, keausan tepi pahat serta laju pengerjaan bahan. Perhitungan normalisasi rasio S/N untuk karakteristik kualitas semakin besar semakin baik dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.19.

Contoh perhitungan normalisasi rasio S/N untuk respon kekasaran permukaan pada kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{v_k} X_i(k)}{\max_{v_k} X_i(k) - \min_{v_k} X_i(k)}$$



$$X_i^*(1) = \frac{1,2135 - (-3,0844)}{5,7132 - (-3,0844)}$$

$$X_i^*(1) = 0,4885$$

Hasil perhitungan normalisasi rasio S/N kombinasi lainnya untuk masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.3 sebagai berikut.

Tabel 4.3 Normalisasi Rasio S/N Masing-Masing Respon

Komb.	S/N SR	S/N VB	S/N LPB	Normalisasi S/N $X_i^*(k)$		
				SR	VB	MRR
1	1,2135	33,4845	61,2751	0,4885	0,2967	0,0839
2	0,4913	33,0200	67,8509	0,4064	0,1586	0,6584
3	-3,0844	32,4864	71,7616	0,0000	0,0000	1,0000
4	3,6133	34,0493	61,3926	0,7613	0,4646	0,0942
5	4,8827	33,7646	67,2261	0,9056	0,3800	0,6038
6	1,2780	33,2831	71,4142	0,4959	0,2369	0,9696
7	3,0991	35,1357	66,1550	0,7029	0,7876	0,5102
8	3,0983	34,4984	71,7074	0,7028	0,5981	0,9953
9	2,0233	34,2276	62,4986	0,5806	0,5176	0,1908
10	4,8999	33,9643	69,8246	0,9076	0,4394	0,8308
11	4,2204	35,2961	61,1310	0,8303	0,8352	0,0713
12	2,8132	33,4019	68,0850	0,6704	0,2722	0,6788
13	5,7132	34,5731	67,3741	1,0000	0,6203	0,6167
14	5,4170	34,1055	70,6618	0,9663	0,4813	0,9039
15	3,9973	33,9794	61,7662	0,8050	0,4438	0,1268
16	5,6379	35,4592	69,7414	0,9914	0,8837	0,8235
17	5,3835	35,8503	60,3149	0,9625	1,0000	0,0000
18	4,0616	34,8054	68,0657	0,8123	0,6894	0,6771

Sumber: Hasil perhitungan

4.4 Perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC)

Sebelum dilakukan perhitungan nilai GRC, terlebih dahulu dilakukan perhitungan nilai *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$ pada masing-masing respon dengan menggunakan persamaan 2.22. *Deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$ adalah selisih absolut antara nilai maksimum hasil normalisasi yang besarnya satu dengan data yang telah dinormalisasi.



Contoh perhitungan *deviation sequence* kekasaran permukaan untuk kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_i(k) - X_i^*(k)|$$

$$\Delta_{0,1}(1) = |1 - 0,4885|$$

$$\Delta_{0,1}(1) = 0,5115$$

Nilai GRC dihitung berdasarkan nilai *deviation sequence* untuk masing-masing respon yang telah diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.23. Contoh perhitungan GRC kekasaran permukaan untuk kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{max}}$$

$$\xi_1(1) = \frac{0 + (0,5 \times 1)}{0,5115 + (0,5 \times 1)}$$

$$\xi_1(1) = 0,4943$$

Hasil perhitungan *deviation sequence* dan GRC masing-masing respon untuk setiap kombinasi ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 *Deviation Sequence* dan *Grey Relational Coefficient*

Komb.	<i>Deviation sequence</i> $\Delta_{0,i}(k)$			<i>Grey relational coefficient</i> $\xi_i(k)$		
	SR	VB	LPB	SR	VB	LPB
1	0,5115	0,7033	0,9161	0,4943	0,4155	0,3531
2	0,5936	0,8414	0,3416	0,4572	0,3728	0,5941
3	1,0000	1,0000	0,0000	0,3333	0,3333	1,0000
4	0,2387	0,5354	0,9058	0,6769	0,4829	0,3557
5	0,0944	0,6200	0,3962	0,8412	0,4464	0,5579
6	0,5041	0,7631	0,0304	0,4979	0,3958	0,9428
7	0,2971	0,2124	0,4898	0,6272	0,7018	0,5052
8	0,2972	0,4019	0,0047	0,6272	0,5544	0,9906
9	0,4194	0,4824	0,8092	0,5438	0,5090	0,3819
10	0,0924	0,5606	0,1692	0,8440	0,4714	0,7471
11	0,1697	0,1648	0,9287	0,7466	0,7522	0,3500
12	0,3296	0,7278	0,3212	0,6027	0,4072	0,6089
13	0,0000	0,3797	0,3833	1,0000	0,5684	0,5661
14	0,0337	0,5187	0,0961	0,9369	0,4908	0,8388

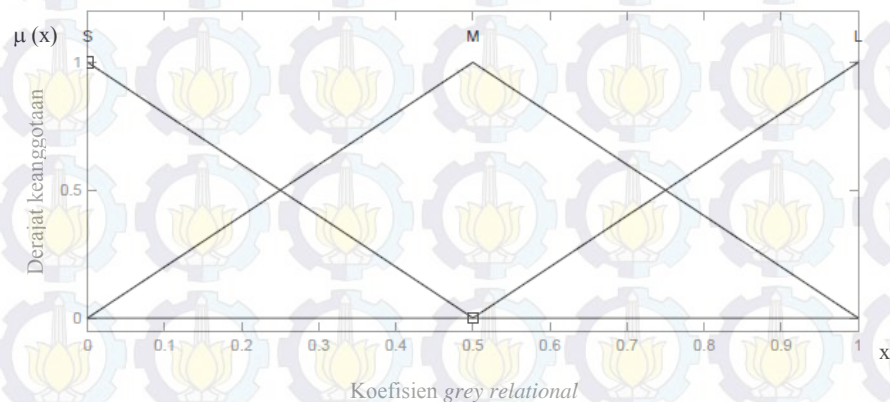


Tabel 4.4 *Deviation Sequence* dan *Grey Relational Coefficient* (lanjutan)

15	0,1950	0,5562	0,8732	0,7194	0,4734	0,3641
16	0,0086	0,1163	0,1765	0,9832	0,8113	0,7391
17	0,0375	0,0000	1,0000	0,9303	1,0000	0,3333
18	0,1877	0,3106	0,3229	0,7270	0,6168	0,6076

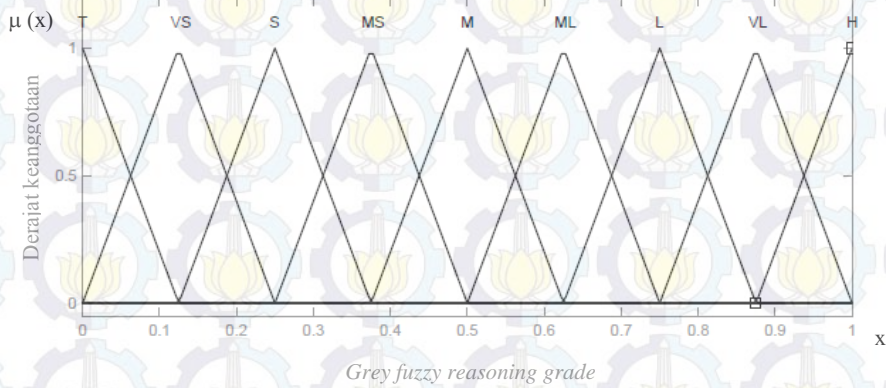
4.5 Fuzzification

Fuzzification merupakan proses pengubahan variabel-variabel input, yaitu nilai GRC dari masing-masing respon kekasaran permukaan, keausan tepi pahat dan laju pengerjaan bahan menjadi bilangan *fuzzy* dengan menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan yang digunakan adalah fungsi keanggotaan kurva segitiga (*triangle*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. Secara *uniform* fungsi keanggotaan didefinisikan menjadi 3 *fuzzy subsets*, yaitu *small* (S), *medium* (M) dan *large* (L).



Gambar 4.1 Fungsi keanggotaan masing-masing respon

Variabel *output* dari sistem logika *fuzzy* pada penelitian ini adalah *grey-fuzzy reasoning grade* (GFRG) yang diubah ke dalam *linguistic fuzzy subsets*, dengan menggunakan fungsi keanggotaan yang berbentuk segitiga. Fungsi keanggotaan untuk variabel *output* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 didefinisikan menjadi 9 *fuzzy subsets*, yaitu *tiny* (T), *very small* (VS), *small* (S), *smaller middle* (SM), *middle* (M), *larger middle* (ML), *large* (L), *very large* (VL) dan *huge* (H).



Gambar 4.2 Fungsi keanggotaan Grey Fuzzy Reasoning Grade

4.6 Fuzzy Rules

Fuzzy rules merupakan aturan yang menjelaskan mengenai hubungan antara variabel *input* dan variabel *output*. Penelitian ini menggunakan 3 variabel *input*, yaitu GRC dari respon kekasaran permukaan, keausan tepi pahat dan laju pengerjaan bahan dengan masing-masing memiliki 3 *fuzzy subsets*, sehingga diperlukan 27 *fuzzy rules* untuk mengkombinasikan seluruh *input*. Keseluruhan *fuzzy rules* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Fuzzy Rules

No	SR	VB	LPB	GFRG
1	S	S	S	T
2	S	S	M	VS
3	S	S	L	S
4	S	M	S	S
5	S	M	M	SM
6	S	M	L	M
7	S	L	S	S
8	S	L	M	SM
9	S	L	L	M
10	M	S	S	VS
11	M	S	M	SM
12	M	S	L	M



Tabel 4.5 *Fuzzy Rules* (lanjutan)

13	M	M	S	SM
14	M	M	M	M
15	M	M	L	LM
16	M	L	S	SM
17	M	L	M	LM
18	M	L	L	VL
19	L	S	S	S
20	L	S	M	SM
21	L	S	L	M
22	L	M	S	M
23	L	M	M	LM
24	L	M	L	L
25	L	L	S	M
26	L	L	M	L
27	L	L	L	H

Sumber: Perangkat komputasi numerik

Contoh pembacaan Tabel 4.5 untuk aturan yang pertama adalah jika kekasaran permukaan *small* (S), keausan tepi pahat *small* (S), dan laju pengerjaan bahan *small* (S), maka GFRG adalah *tiny* (T).

4.7 *Defuzzification*

Defuzzification merupakan pengubahan nilai *fuzzy* menjadi *grey fuzzy reasoning grade* (GFRG) dengan cara melakukan pemetaan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas. Variabel input dari proses *defuzzification* adalah nilai GRC. *Output* yang dihasilkan dari proses *defuzzification* adalah GFRG yang berupa suatu bilangan pada domain himpunan *fuzzy* tersebut. GFRG akan digunakan sebagai variabel respon yang mewakili variabel respon kekasaran permukaan, keausan tepi pahat dan laju pengerjaan bahan. Tabel 4.6 menunjukkan hasil proses *defuzzification* yang berupa nilai GFRG untuk setiap kombinasi.



Tabel 4.6 Grey Fuzzy Reasoning Grade (GFRG)

No.	GFRG	No.	GFRG
1	0,3906	10	0,6831
2	0,4523	11	0,4852
3	0,4764	12	0,6297
4	0,4901	13	0,5818
5	0,5801	14	0,543
6	0,5666	15	0,6778
7	0,5967	16	0,6764
8	0,3906	17	0,4904
9	0,4523	18	0,7534

Sumber: Hasil perhitungan

4.8 Hasil Optimasi

Desain eksperimen yang berupa matriks ortogonal memungkinkan untuk mengelompokkan pengaruh dari masing-masing variabel-variabel proses pada level yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.7 sebagai berikut:

Tabel 4.7 Nilai GFRG pada Matrik Ortogonal

Komb.	FL	V _c	V _f	A _a	GFRG
1	1	1	1	1	0,3906
2	1	1	2	2	0,4523
3	1	1	3	3	0,4764
4	1	2	1	1	0,4901
5	1	2	2	2	0,5801
6	1	2	3	3	0,5666
7	1	3	1	2	0,5967
8	1	3	2	3	0,6831
9	1	3	3	1	0,4852
10	2	1	1	3	0,6297
11	2	1	2	1	0,5818
12	2	1	3	2	0,543
13	2	2	1	2	0,6778
14	2	2	2	3	0,6764
15	2	2	3	1	0,4904
16	2	3	1	3	0,7534
17	2	3	2	1	0,6248
18	2	3	3	2	0,6439



Berdasarkan Tabel 4.7 dapat dihitung rata-rata GFRG pada masing-masing level variabel proses seperti ditunjukkan pada Tabel 4.8. Sebagai contoh perhitungan, nilai rata-rata GFRG dari variabel proses *flow rate* pada level satu adalah sebagai berikut:

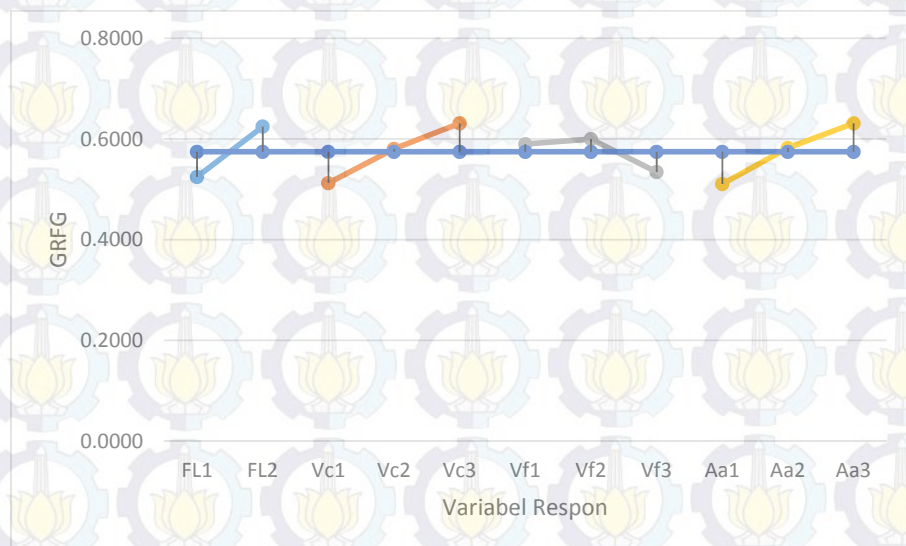
$$\bar{\eta}_a = \frac{0,3906 + 0,4523 + 0,4764 + 0,4901 + 0,5801 + 0,5666 + 0,5967 + 0,6831 + 0,4852}{9} = 0,5246$$

Tabel 4.8 Rata-rata GFRG pada Masing-Masing Level Variabel Proses

	Level 1	Level 2	Level 3	Selisih
FL	0,5246	0,6246	-	0,1000
V _c	0,5123	0,5802	0,6312	0,1189
V _f	0,5897	0,5998	0,5343	0,0555
A _a	0,5105	0,5823	0,6309	0,1205
Rata-rata	0,5746			

Sumber: Hasil perhitungan

Plot untuk nilai rata-rata dari GFRG pada masing-masing level dari variabel proses *flow rate*, kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong aksial ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Plot rata-rata pada masing-masing level variabel proses



Berdasarkan Gambar 4.3 plot rata-rata nilai GFRG masing-masing level variabel proses, kombinasi level-level variabel proses yang menghasilkan respon optimum dapat ditentukan. Kombinasi level dari variabel proses tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Kombinasi Variabel Proses Respon Optimum

Variabel proses	Level	Nilai
FL	2	0,5 l/min
Vc	3	109,9 m/min
Vf	2	440 mm/min
Aa	3	0,9 mm

Sumber: Hasil analisa

4.9 Analisis Variansi dan Persen Kontribusi

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui variabel-variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan dan besarnya kontribusi variabel-variabel proses terhadap respon yang diteliti. Pada penelitian ini ANOVA dilakukan terhadap nilai GFRG yang mewakili semua respon secara serentak. Perhitungan ANOVA GFRG dilakukan berdasarkan rumus pada Tabel 2.4. Contoh perhitungan ANOVA dari nilai GFRG adalah sebagai berikut:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$SS_T = (0,3906-0,5746)^2 + (0,4523-0,5746)^2 + (0,4764-0,5746)^2 + (0,4901-0,5746)^2 + (0,5801-0,5746)^2 + (0,5666-0,5746)^2 + (0,5967-0,5746)^2 + (0,6831-0,5746)^2 + (0,4852-0,5746)^2 + (0,6297-0,5746)^2 + (0,5818-0,5746)^2 + (0,543-0,5746)^2 + (0,6778-0,5746)^2 + (0,6764-0,5746)^2 + (0,4904-0,5746)^2 + (0,7534-0,5746)^2 + (0,6248-0,5746)^2 + (0,6439-0,5746)^2$$

$$SS_T = 0,157430$$

$$SS_{FL} = n_{FL} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$$

$$SS_{FL} = 9 \times [(0,5246-0,5746)^2 + (0,6246-0,5746)^2]$$



$$= 0,045010$$

$$MS_{FL} = \frac{SS_{FL}}{df_{FL}}$$

$$= \frac{0,045010}{1}$$

$$= 0,045010$$

$$F_{FL} = \frac{MS_{FL}}{MSE}$$

$$= \frac{0,045010}{0,001073}$$

$$= 41,95$$

Hasil perhitungan ANAVA untuk GFRG secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 ANAVA dan Kontribusi GFRG

Source	DF	SS	MS	F	P-value	ρ
FL	1	0,045010	0,045010	41,95	0,00	27,91 %
V _c	2	0,042690	0,021345	19,89	0,00	25,75 %
V _f	2	0,014930	0,007465	6,96	0,013	8,12 %
A _a	2	0,044060	0,022030	20,53	0,00	26,62 %
Error	10	0,010730	0,001073			11,59 %
Total	17	0,157430				100 %

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.10 menunjukkan bahwa *p-value* untuk semua variabel proses lebih besar dari pada α ($\alpha = 0,05$), sehingga semua variabel proses *flow rate*, kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong aksial memiliki pengaruh yang signifikan terhadap multi respon.

Porsi dari masing-masing variabel proses terhadap total variansi respon yang diamati, ditunjukkan pada Tabel 4.10. Jika besar persen kontribusi *error* kurang dari 15%, maka tidak ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan. Jika besar persen kontribusi *error* lebih dari 15%, maka mengindikasikan ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan sehingga *error* yang terjadi terlalu besar.



Persen kontribusi dihitung dari hasil analisis variansi dengan menggunakan persamaan 2.30 dan 2.31. Contoh perhitungan persen kontribusi untuk variabel proses *flow rate* adalah sebagai berikut:

$$SS'_{FL} = SS_{FL} - db_{FL} \cdot MSE$$

$$SS'_{FL} = 0,0450101 - (1 \times 0,001073)$$

$$SS'_{FL} = 0,043937$$

$$\rho_{FL} = \frac{SS'_{FL}}{SS_T} \times 100 \%$$

$$\rho_{FL} = \frac{0,04397}{0,157430} \times 100 \%$$

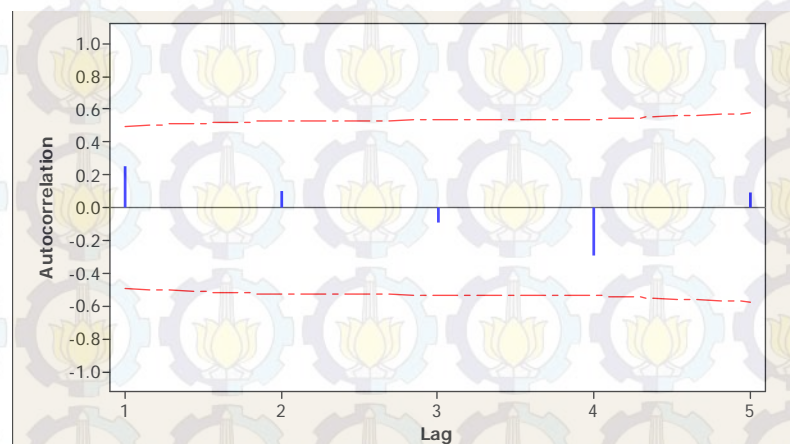
$$\rho_{AN} = 27,91 \%$$

4.10 Pengujian Asumsi Residual

Dalam setiap pendugaaan model diperlukan asumsi bahwa residual bersifat independen, identik dan berdistribusi normal dengan rata-rata nol pada variansi IIDN $(0, \sigma^2)$ tertentu.

4.10.1 Uji Independen

Uji independen dilakukan dengan menggunakan plot ACF (*auto correlation function*). Residual bersifat independen jika nilai ACF pada setiap *lag* berada dalam interval $\pm 2/\sqrt{n}$, yaitu $\pm 0,471$. Gambar 4.4 menunjukkan bahwa tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang keluar dari batas interval. Hal ini menunjukkan bahwa residual bersifat independen karena tidak ada korelasi antar residual.

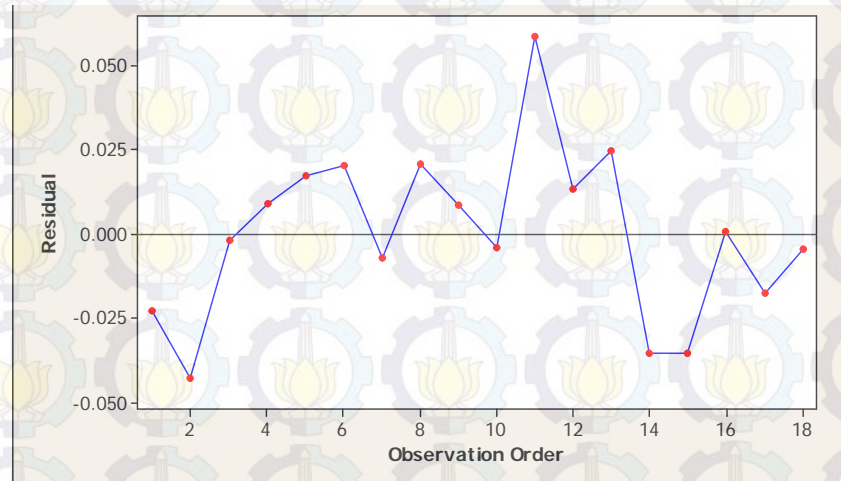


Gambar 4.4 Plot ACF (*auto correlation function*)



4.10.2 Uji Identik

Assumsi residual bersifat identik jika data pada plot *residual versus observation order* tersebar secara acak disekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Gambar 4.5 menunjukkan bahwa data tersebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi residual bersifat identik terpenuhi.



Gambar 4.5 Plot *residual versus observation order*

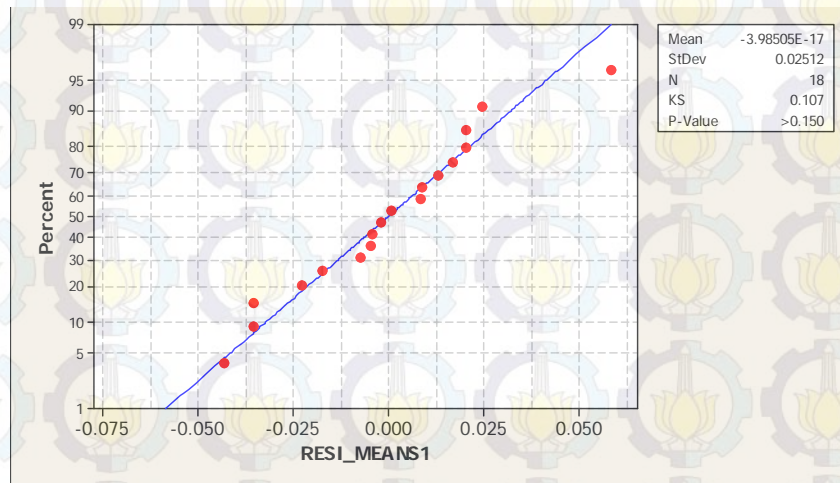
4.10.3 Uji Distribusi Normal

Assumsi residual berdistribusi normal dengan mean sama dengan nol dan nilai variansi tertentu diuji dengan menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov*. Hipotesa yang digunakan adalah sebagai berikut:

H_0 : residual berdistribusi normal

H_1 : residual tidak berdistribusi normal

H_0 gagal ditolak jika $p\text{-value} > \alpha$ ($\alpha = 0,05$). Hasil uji kenormalan residual dengan menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov* dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Plot uji distribusi normal

Berdasarkan Gambar 4.6 didapatkan nilai $p\text{-value} > 0,15$ yang berarti lebih besar dari pada $\alpha = 0,05$. Hal ini menunjukkan bahwa H_0 gagal ditolak, sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa residual berdistribusi normal. Nilai mean sangat kecil atau mendekati nol, yaitu sebesar $-3,9805 \times 10^{-17}$. Variansi dari residual memiliki nilai sebesar $(0,107)^2$. Dengan demikian asumsi residual berdistribusi normal dengan *mean* sama dengan nol dan nilai variansi tertentu terpenuhi.

4.11 Prediksi Multirespon Optimum

Berdasarkan kombinasi nilai rata-rata GFRG seperti ditunjukkan pada Tabel 4.10, dapat diprediksi nilai GFRG untuk kombinasi level variabel proses yang menghasilkan respon optimum. Kombinasi level-level variabel proses yang menghasilkan respon optimum adalah sebagai berikut:

1. *Flow rate* level 2
2. Kecepatan potong level 3
3. Kecepatan makan level 2
4. Kedalaman potong aksial level 3

Nilai prediksi GFRG berdasarkan kombinasi level yang optimum dapat dihitung menggunakan persamaan 2.29.



$$\hat{\mu} = \gamma_m + \sum_{i=1}^o (\bar{\gamma}_i - \gamma_m)$$

$$\hat{\mu} = 0,5746 + ((0,6246 - 0,5746) + (0,6312 - 0,5746) + (0,5998 - 0,5746) + (0,6309 - 0,5746))$$

$$\hat{\mu} = 0,7627$$

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai prediksi GFRG untuk kombinasi variabel proses yang menghasilkan respon optimum adalah sebesar 0,7627.

Interval keyakinan untuk GFRG prediksi dihitung berdasarkan persamaan 2.32. Sedangkan jumlah pengamatan efektif (n_{eff}) dihitung dengan menggunakan persamaan 2.34 sebagai berikut:

$$n_{eff} = \frac{\text{total percobaan}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan variabel proses untuk menduga rata-rata}}$$

$$n_{eff} = \frac{18 \times 2}{1 + (1 + 2 + 2 + 2)}$$

$$n_{eff} = 4,5$$

Perhitungan interval keyakinan rata-rata GFRG prediksi hasil optimasi adalah sebagai berikut:

$$CI_p = \sqrt{\frac{F_{(\alpha, 1, df_E)} MS_E}{n_{eff}}}$$

$$CI_p = \sqrt{\frac{F_{(0,05, 1, 10)}}{4,5}}$$

$$CI_p = \sqrt{\frac{4,96 \times 0,001073}{4,5}}$$

$$CI_p = \pm 0,034$$

Berdasarkan hasil perhitungan, maka interval keyakinan nilai GFRG prediksi yang menghasilkan respon optimum dengan tingkat keyakinan 95% adalah 0,7627 $\pm 0,034$ ($0,7287 \leq \hat{\mu}_{GFRG} \leq 0,7967$).



4.12 Percobaan Konfirmasi

Percobaan konfirmasi dilakukan untuk melakukan validasi terhadap hasil yang telah diperoleh. Proses validasi dilakukan dengan cara membandingkan interval keyakinan rata-rata GFRG prediksi dengan interval keyakinan rata-rata GFRG percobaan konfirmasi. Selain itu, validasi juga dilakukan dengan membandingkan hasil respon percobaan kombinasi awal dengan respon kombinasi optimum.

Kombinasi optimum yang digunakan pada eksperimen konfirmasi ditunjukkan oleh Tabel 4.11 sebagai berikut:

Tabel 4.11 Kombinasi Faktor untuk Kombinasi Optimum

Variabel Proses	Kombinasi Optimum
FL	0,5 l/min
V _c	109,9 m/min
V _f	440 mm/min
A _a	0,9 mm

Percobaan konfirmasi pada kombinasi optimum dilakukan dengan replikasi sebanyak tiga kali. Hasil dari percobaan konfirmasi dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Hasil Percobaan Konfirmasi pada Kombinasi Optimum

Percobaan	Kombinasi Optimum		
	SR (μm)	VB (mm)	LPB (mm^3/min)
1	0,512	0,016	4919,255
2	0,503	0,017	4858,896
3	0,505	0,016	4937,656
Rata-rata	0,507	0,016	4898,276

Sumber: Hasil percobaan

Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan rasio S/N berdasarkan karakteristik kualitas dari masing-masing respon percobaan konfirmasi dengan menggunakan persamaan 2.16 dan 2.18. Rasio S/N masing-masing respon pada percobaan konfirmasi ditunjukkan pada Tabel 4.13.



Tabel 4.13 Rasio S/N pada Kombinasi Optimum

	Rasio S/N		
	SR	VB	LPB
Kombinasi optimum	5,9053	35,7778	73,8126

Nilai rasio S/N masing-masing respon kemudian dinormalisasi dengan menggunakan persamaan 2.19. Langkah selanjutnya, dari hasil normalisasi rasio S/N untuk masing-masing respon kemudian dilakukan perhitungan *deviation sequence* dan GRC dengan menggunakan persamaan 2.22 dan 2.23. Langkah terakhir adalah menentukan GFRG eksperimen konfirmasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Nilai GRC dan GFRG Percobaan Konfirmasi untuk Kombinasi Optimum

	GRC			GFRG
	SR	VB	LPB	
Kombinasi optimum	0,9582	0,9587	0,7362	0,7781

Interval keyakinan untuk GFRG percobaan konfirmasi dihitung berdasarkan persamaan 2.35. Jumlah pengamatan efektif (n_{eff}) dihitung dengan menggunakan persamaan 2.34 sebagai berikut:

$$n_{eff} = \frac{\text{total percobaan}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan variabel proses untuk menduga rata - rata}}$$

$$n_{eff} = \frac{18 \times 2}{1 + (1 + 2 + 2 + 2)}$$

$$n_{eff} = 4,5$$

Perhitungan interval keyakinan rata-rata GFRG hasil percobaan konfirmasi adalah sebagai berikut:

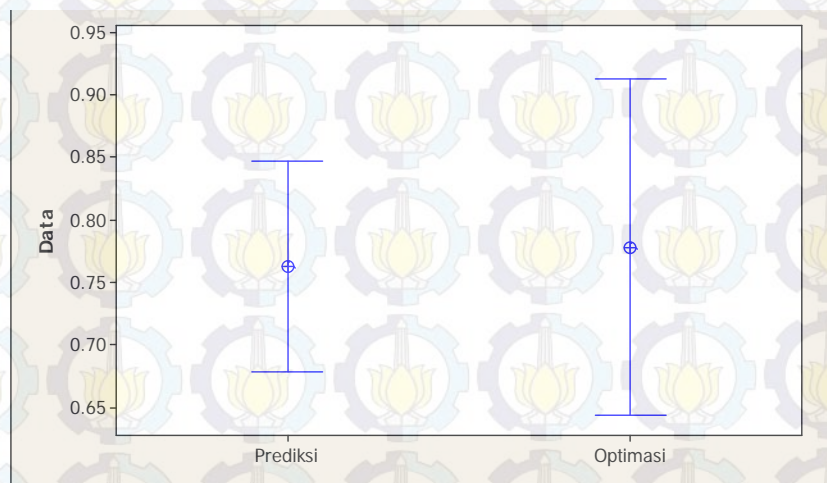
$$CI_{CE} = \sqrt{F_{(\infty, 1, df_E)} MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]}$$

$$CI_{CE} = \sqrt{F_{(0,05, 1, 10)} 0,001073 \left[\frac{1}{4,5} + \frac{1}{3} \right]}$$



$$CI_{CE} = \sqrt{4,96 \times 0,001073 \times \left[\frac{1}{4,5} + \frac{1}{3} \right]}$$
$$CI_{CE} = 0,054$$

Berdasarkan hasil perhitungan, interval keyakinan nilai GFRG prediksi yang menghasilkan respon optimum dengan tingkat keyakinan 95% adalah $0,6359 \pm 0,054$ ($0,7241 \leq \hat{\mu}_{GFRG} \leq 0,8321$). Gambar 4.7 menunjukkan plot interval keyakinan rata-rata GFRG prediksi dan percobaan konfirmasi.



Gambar 4.7 Plot interval keyakinan hasil prediksi dan percobaan konfirmasi

Kombinasi level-level dari variabel proses yang menghasilkan respon optimum dinyatakan valid apabila nilai rata-rata GFRG percobaan konfirmasi berada di dalam interval rata-rata GFRG prediksi.

Nilai rata-rata GFRG percobaan konfirmasi (0,7781) berada didalam interval rata-rata prediksi ($0,7287 \leq \hat{\mu}_{GFRG} \leq 0,7967$). Maka dapat disimpulkan bahwa pengaturan kombinasi level-level variabel proses pada kondisi optimum yang telah didapat adalah valid.



4.13 Pengujian Perbedaan Respon Hasil Kombinasi Awal dan Hasil Kombinasi Optimum

Uji statistik perlu dilakukan untuk mengetahui apakah nilai respon pada kombinasi awal dengan respon pada kondisi optimum berbeda atau sama. Adapun uji statistik yang digunakan adalah sebagai berikut:

a) Uji kenormalan

Hipotesa untuk uji kenormalan adalah sebagai berikut:

H_0 : Data berdistribusi normal

H_1 : Data tidak berdistribusi normal

H_0 ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Hasil uji kenormalan data untuk masing-masing respon secara rinci ditunjukkan pada Lampiran 4, Lampiran 5 dan Lampiran 6. Hasil uji kenormalan data pada masing-masing respon untuk kombinasi optimal dan kombinasi awal ditunjukkan pada Tabel 4.15 dan Tabel 4.16.

Tabel 4.15 Hasil Uji Kenormalan Data Pada Kombinasi Optimum

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
SR	> 0,150	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
VB	0,079	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
LPB	> 0,150	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.16 Hasil Uji Kenormalan Data Pada Kombinasi Awal

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
SR	> 0,150	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
VB	> 0,150	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal
LPB	> 0,150	H_0 gagal ditolak	Berdistribusi normal

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.15 dan Tabel 4.16 menunjukkan bahwa *p-value* untuk masing-masing respon, baik pada kombinasi optimum maupun pada kombinasi awal, adalah lebih besar dari pada $\alpha = 0,05$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa data dari



semua respon pada kombinasi optimum dan data dari semua respon pada kombinasi awal adalah berdistribusi normal.

b) Uji kesamaan variansi

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

H_0 ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Dengan:

$$\sigma_1^2 = \text{Variansi kombinasi awal}$$

$$\sigma_2^2 = \text{Variansi kombinasi optimum}$$

Uji kesamaan variansi pada data dari semua respon secara rinci ditunjukkan pada Lampiran 7, Lampiran 8 dan Lampiran 9. Hasil uji kesamaan variansi antara data dari semua respon pada kombinasi awal dan data dari semua respon pada kombinasi optimum untuk masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Hasil uji kesamaan variansi

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
SR	0,029	H_0 ditolak	Variansi tidak sama
VB	0,013	H_0 ditolak	Variansi tidak sama
LPB	0,241	H_0 gagal ditolak	Variansi sama

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.17 menunjukkan bahwa *p-value* untuk kekasaran permukaan (SR) dan keausan tepi pahat (VB) bernilai lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$. Dengan demikian kekasaran permukaan (SR) untuk kombinasi awal dan optimum memiliki variansi yang berbeda. Respon laju pengerjaan bahaan (LPB) memiliki *p-value* lebih besar dari pada $\alpha = 0,05$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa laju pengerjaan bahaan (LPB) untuk kombinasi awal dan optimum memiliki variansi yang sama.

c) Uji kesamaan rata-rata

Hipotesis pengujian kesamaan rata-rata untuk kekasaran permukaan (SR) dan keausan tepi pahat (VB) adalah:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$



$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

Hipotesis pengujian kesamaan rata-rata untuk laju pengerjaan bahan (LPB) adalah:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 < \mu_2$$

H_0 ditolak jika *p-value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Dengan:

μ_1 = Kombinasi awal

μ_2 = Kombinasi optimum

Uji kesamaan rata-rata pada semua data respon secara rinci ditunjukkan pada Lampiran 10. Hasil uji kesamaan rata-rata dari data pada kombinasi awal dan data pada kombinasi optimum untuk masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Hasil Uji Kesamaan Rata-Rata

Respon	P-value	Keterangan	Kesimpulan
SR	0,028	H_0 gagal ditolak	$\mu_1 > \mu_2$
VB	0,000	H_0 gagal ditolak	$\mu_1 > \mu_2$
LPB	0,000	H_0 gagal ditolak	$\mu_1 < \mu_2$

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.18 menunjukkan bahwa *p-value* untuk masing-masing respon adalah lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata untuk respon kekasaran permukaan (SR) dan keausan tepi pahat (VB) pada kondisi awal lebih besar dibandingkan dengan kombinasi optimum. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai rata-rata pada kombinasi awal. Nilai rata-rata respon laju pengerjaan bahan (LPB) pada kombinasi awal lebih kecil dibandingkan dengan kombinasi optimum. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan nilai rata-rata pada kombinasi awal.



4.14 Perbandingan antara Respon Hasil Kombinasi Awal dan Kombinasi

Optimum

Percobaan dengan menggunakan kombinasi awal bertujuan untuk mengetahui peningkatan karakteristik kinerja dari masing-masing respon, baik secara individu maupun secara serentak, dengan cara membandingkan hasil respon sebelum dilakukan optimasi (kombinasi awal) dengan respon setelah dilakukan optimasi (kombinasi optimum). Pada percobaan ini kombinasi awal diatur pada level tengah, yaitu pada level dua untuk variabel proses yang memiliki tiga level. Untuk variabel proses yang memiliki dua level kombinasi awal diatur pada level satu. Pengaturan variabel proses yang digunakan sebagai kombinasi awal ditunjukkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Pengaturan Level Kombinasi Awal

Variabel Proses	Kombinasi Optimum
FL	0,2 l/min
V _c	94,2 m/min
V _f	440 mm/min
V _r	0,6 mm

Percobaan dengan kombinasi awal dilakukan replikasi sebanyak dua kali. Hasil dari percobaan pada kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Respon Percobaan Kombinasi Awal

Percobaan	Kombinasi Awal		
	SR (μm)	VB (mm)	LPB (mm^3/min)
1	0,542	0,020	2817,503
2	0,597	0,021	2807,515
Rata-rata	0,569	0,021	2812,509

Sumber: Hasil percobaan

Perhitungan rasio S/N dilakukan berdasarkan karakteristik kualitas dari masing-masing respon percobaan dengan menggunakan kombinasi awal. Rasio S/N masing-masing respon pada percobaan kombinasi awal ditunjukkan pada Tabel 4.21.



Tabel 4.21 Rasio S/N Kombinasi Awal

	Rasio S/N		
	SR	VB	LPB
Kombinasi optimum	4,8827	33,7646	67,2261

Sumber: Hasil perhitungan

Langkah selanjutnya adalah melakukan normalisasi rasio S/N untuk masing-masing respon untuk mendapatkan nilai GRC. Setelah didapatkan nilai GRC masing-masing respon, kemudian dilakukan penentuan nilai GFRG kombinasi awal untuk dibandingkan dengan nilai GFRG pada kombinasi optimum, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Perbandingan GFRG Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

	GRC			GFRG
	SR	VB	LPB	
Kombinasi awal	0,8412	0,4464	0,5579	0,5801
Kombinasi optimum	0,9582	0,9587	0,7362	0,7781
Peningkatan				34,13%

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.22 menunjukkan bahwa nilai GFRG pada percobaan konfirmasi kombinasi optimum lebih besar dibandingkan dengan dengan nilai kombinasi awal. Nilai GFRG setelah dilakukan optimasi mengalami peningkatan sebesar 74,5% dari nilai GFRG sebelum dilakukan optimasi.

Perbandingan respon individu pada kombinasi awal dan kombinasi optimum ditunjukkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Perbandingan Respon Individu pada Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

Variabel respon	Kombinasi awal	Kombinasi optimum	Keterangan	
SR	0,569	0,507	10,90 %	Turun
VB	0,021	0,016	23,81 %	Turun
LPB	2812,509	4898,276	74,16 %	Naik

Sumber: Hasil perhitungan



Berdasarkan Tabel 4.23, nilai variabel respon kekasaran permukaan (SR) dan keausan tepi pahat (VB) mengalami penurunan sebesar 10,90 % dan 23,81 %. Nilai variabel respon laju pengerjaan bahan (LPB) mengalami peningkatan sebesar 74,16 %. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik dari respon keausan pahat dan kekasaran permukaan, serta semakin besar semakin baik untuk laju pengerjaan bahan telah terpenuhi.

4.15 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Multi Respon

Analisis variansi pengaruh variabel proses *flow rate*, kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong aksial terhadap multirespon (GFRG) ditunjukkan pada Tabel 4.10. Hasil analisis menunjukkan bahwa variabel proses yang signifikan secara statistik mempengaruhi nilai GFRG adalah *flow rate*, kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong aksial. Kontribusi terbesar dalam menurunkan total variansi diberikan oleh variabel proses *flow rate* sebesar 27,91%, kecepatan potong sebesar 25,75%, kecepatan makan sebesar 8,12% dan kedalaman potong aksial sebesar 26,62 %. Penelitian tentang pengaruh variabel proses *end milling* terhadap kekasaran permukaan dan laju pengerjaan bahan telah dilakukan oleh Maiyar dkk. (2013). Hasil penelitian menyatakan bahwa kecepatan potong, gerak makan dan kedalaman potong memiliki kontribusi dalam menurunkan total variansi respon secara serentak.

4.16 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Respon Individu

Analisis variansi pada respon individu ditunjukkan pada Lampiran 11. Ringkasan hasil perhitungan persen kontribusi dari masing-masing variabel proses *flow rate* cairan pendingin, kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong aksial terhadap total variansi respon yang diamati ditunjukkan oleh Tabel 4.24.



Tabel 4.24 Persen Kontribusi Faktor Signifikan terhadap Respon Individu

Variabel proses	SR			VB			LPB		
	F	P	% kontribusi	F	P	% kontribusi	F	P	% kontribusi
FL	36,54	0,000	40,83	27,42	0,000	22,88	3,30	0,099	0,26
Vc	10,42	0,004	21,65	26,68	0,000	44,50	0,42	0,671	0,13
Vf	9,12	0,006	18,65	9,20	0,005	14,20	8,14	0,008	1,59
Aa	0,71	0,514	0,66	3,13	0,088	3,69	433,30	0,000	96,39

Sumber: Hasil perhitungan

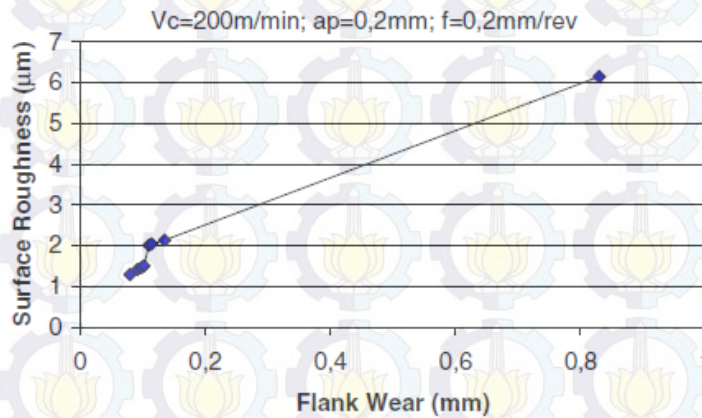
4.16.1 Kekasaran Permukaan

Berdasarkan Tabel 4.24, variabel proses yang signifikan secara statistik mempengaruhi kekasaran permukaan adalah *flow rate* (FL) cairan pendingin, kecepatan potong (V_c) dan kecepatan makan (V_f). Kontribusi terbesar dalam menurunkan total variansi diberikan oleh variabel proses *flow rate* sebesar 40,83%, kecepatan potong sebesar 21,65%, kecepatan makan sebesar 18,65% dan kedalaman potong aksial sebesar 0,66%.

Secara proses dapat dijelaskan bahwa tingkat kekasaran permukaan benda kerja akan turun dengan bertambahnya kecepatan potong dan akan meningkat dengan bertambahnya kecepatan makan. Penelitian tentang pengaruh variabel proses *end milling* terhadap kekasaran permukaan telah dilakukan oleh Shammari dkk. (2012). Hasil penelitian menyatakan bahwa kecepatan potong dan kecepatan makan berpengaruh terhadap kekasaran permukaan material AISI D2. Tingkat kekasaran permukaan juga dipengaruhi oleh tingkat keausan pahat selama proses pemotongan berlangsung. Kekasaran permukaan akan meningkat seiring dengan meningkatnya keausan pahat. Aslan (2005) telah melakukan penelitian tentang pengaruh keausan pahat terhadap kekasaran permukaan pada material X210 Cr12 *cold-work tool steel*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekasaran permukaan meningkat dengan meningkatnya keausan pahat seperti ditunjukkan pada gambar 4.8. Berdasarkan persamaan 2.10, kekasaran permukaan dipengaruhi oleh radius pojok dari pahat selain oleh gerak makan. Semakin besar radius pojok, maka kekasaran permukaan semakin rendah. Terjadinya keausan tepi pahat selama proses



pemotongan berlangsung, mengakibatkan berkurangnya radius pojok dari pahat, sehingga menyebabkan kekasaran permukaan meningkat.



Gambar 4.8 Grafik pengaruh keausan pahat terhadap kekasaran permukaan (Aslan, 2005)

Dengan pemberian cairan pendingin dan pengaturan *flow rate* yang tepat dapat menurunkan temperatur pada pahat selama proses pemotongan berlangsung sehingga kekerasan pahat dapat dipertahankan. Tingkat kekerasan pahat yang stabil selama proses pemotongan berlangsung, dapat menurunkan tingkat keausan pahat.

4.16.2 Keausan Pahat

Berdasarkan Tabel 4.24, variabel proses yang signifikan secara statistik mempengaruhi keausan tepi pahat adalah *flow rate* (FL) cairan pendingin, kecepatan potong (V_c) dan kecepatan makan (V_f). Kontribusi terbesar dalam menurunkan total variansi diberikan oleh variabel proses kecepatan potong sebesar 44,50%, diikuti oleh *flow rate* sebesar 22,88%, kecepatan makan sebesar 14,20% dan kedalaman potong aksial sebesar 3,69%.

Secara proses dapat dijelaskan bahwa temperatur pahat akan meningkat dengan bertambahnya kecepatan potong dan kecepatan makan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Hal ini terjadi karena untuk waktu yang sama, kecepatan potong dan kecepatan makan yang tinggi akan menghasilkan frekuensi gesekan antara pahat dan benda kerja yang tinggi. Peningkatan temperatur pahat selama proses



pemotongan berlangsung dapat menurunkan kekerasan dari pahat seperti ditunjukkan pada gambar 2.8. Hal ini akan menyebabkan kekuatan dan ketahanan abrasi pahat akan mengalami penurunan sehingga keausan pahat akan meningkat.

Fungsi nitrogen cair pada proses pemotongan logam adalah sebagai media pendingin untuk menurunkan panas akibat adanya gesekan antara pahat dengan benda kerja selama proses pemotongan berlangsung, sehingga dengan adanya nitrogen cair kekerasan pahat dapat dipertahankan. Dengan pengaturan *flow rate* cairan pendingin yang tepat fungsi nitrogen cair untuk menurunkan panas dapat ditingkatkan.

4.16.3 Laju Pengerjaan Bahan

Berdasarkan Tabel 4.24, variabel proses yang signifikan secara statistik mempengaruhi laju pengerjaan bahan adalah kecepatan makan (V_f) dan kedalaman potong aksial (A_a). Kontribusi terbesar dalam menurunkan total variansi diberikan oleh variabel proses kedalaman potong aksial sebesar 96,39%, diikuti oleh kecepatan makan sebesar 1,59%, *flow rate* sebesar 0,26% dan kecepatan potong sebesar 0,13%.

Kecepatan makan pada proses pemotongan logam berpengaruh terhadap waktu pemotongan. Peningkatan kecepatan makan, akan menyebabkan waktu proses pemotongan semakin rendah. Kedalaman potong berpengaruh terhadap volume material yang terbuang selama proses pemotongan berlangsung. Peningkatan kedalaman potong, mengakibatkan volume material yang terbuang selama proses pemotongan semakin besar. Hal ini sesuai dengan teori laju pengerjaan bahan pada persamaan 2.11.



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan, proses optimasi, percobaan konfirmasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dari penelitian yang berjudul “Optimasi Multi Respon Menggunakan Metode Taguchi Grey-Fuzzy Pada Proses *End Milling* Material Assab Xw-42 Dengan Pendinginan Nitrogen Cair,” dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kontribusi variabel-variabel proses dalam mengurangi total variansi dari respon kekasaran permukaan, keausan tepi pahat dan laju pengerjaan bahan secara serentak adalah sebagai berikut:
 - *Flow rate* sebesar 27,91%.
 - Kecepatan potong sebesar 25,75%.
 - Kecepatan makan sebesar 8,12%.
 - Kedalaman potong aksial sebesar 26,62%.
2. Pengaturan kombinasi variabel-variabel proses *end milling* yang secara signifikan dapat meminimalkan kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat serta memaksimalkan laju pengerjaan bahan secara serentak adalah sebagai berikut:
 - *Flow rate* sebesar 0,5 l/menit.
 - Kecepatan potong sebesar 109,9 m/menit.
 - Kecepatan makan sebesar 94,2 mm/menit.
 - Kedalaman potong aksial sebesar 0,9 mm.



5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Metode optimasi multi respon dalam penelitian ini adalah *grey relational analysis* dan Logika *fuzzy*. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan metode-metode optimasi yang lain sebagai perbandingan.
2. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk mencoba menggunakan level variabel-variabel proses dengan rentang yang berbeda untuk membandingkan besarnya kontribusi variabel proses dalam mengurangi total variansi respon yang diteliti.

DAFTAR PUSTAKA

- Aslan, E. (2005), "Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC)," *Materials and Design*, Vol. 26, Pp. 21–27.
- ASME (American Society of Mechanical Engineers), (1985), "Milling cutter and end mill," United Engineering Centre, ANSI/ASME B94.19.
- Bienkowski, K. (1993), "Coolant & Lubricant The Truth," *Manufacturing Engineering*, Pp. 90-96.
- Cecil, J. & Jay, D.H. (1985), *Engineering Drawing and Design*, McGraw-Hill, USA.
- Chetan, Gosh, S. dan Rao, V. (2015), "Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review," *Journal of Cleaner Production*, Pp. 1-18.
- Datta, S. dan Mahapatra, S. S. (2010), "Modeling, Simulation and Parametric Optimization of Wire EDM Process using Response Surface Methodology Coupled with Grey-Taguchi Technique," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 2, No. 5, Pp. 162-183.
- Hayajneh, T.M, Tahat, S.M. dan Bluhm, J. (2007), "A Study of the Effects of Machining Parameters on the Surface Roughness in the End-Milling Process," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 1, No. 1, Pp. 1-5.
- ISO 8688-2 (1989), *Tool Life Testing in Milling – Part 2: End Milling*, International Standard.
- Kalpakjian, S. dan Steven, R. S. (2001), *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 4rd edition, Prentice Hall, New Jersey.
- Kaynak, Y., Karaca, E.H., Noebe, D.R. dan Jawahir, S.I. (2013), "Analysis of Tool-wear and Cutting Force Components in Dry, Preheated, and Cryogenic Machining of NiTi Shape Memory Alloys," *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO)*, Vol.8, Pp. 498-503
- Ku, H. dan Chia, C., (2006), *Design of Multi-Purpose Carbide End Mill*, *Journal - The Institution of Engineers, Malaysia*, Vol. 67, No. 2, Pp.3.
- Lohithaksha M Maiyar, M.L., Ramanujam, R., Venkatesan, K. dan J.Jerald, J. (2013), "Optimization of Machining Parameters for End Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi Based Grey Relational Analysis,"

International Conference on DESIGN AND MANUFACTURING, Vol. 64, Pp. 1276-1282.

Lu, H. S., Chen, J. Y. dan Chung, C. T. (2008), "The Optimal Cutting Parameter Design of Rough Cutting Process in Side Milling," *Journal of Achievements in Material and Manufacturing Engineering*, vol. 29, Pp. 183-186.

Kusumadewi, S. dan Purnomo, H. (2010), *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*, Edisi kedua, Graha Ilmu, Yogyakarta.

Lin, J. L. dan Lin, C. L. (2002), "The Use of Orthogonal Array with Grey Relational Analysis to Optimize the Electrical Discharge Machining Process Performance with Multiple Characteristics," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, Pp. 237-244.

Mahesh, P.T., dan Rajesh, R. (2014), "Optimal Selection of Process Parameters in CNC End Milling of Al 7075-T6 Alluminium Alloy Using Taguchi-Fuzzy Approach," *International Conference on Advances in Manufacturing and Material Engineering (AMME)*, Vol. 5, Pp. 2493-2502.

Park, S. H. (1996), *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, Thomson Press, New Delhi.

Ravi, S., dan Kumar, P.M. (2011), "Experimental Investigation on Cryogenic Cooling by Liquid Nitrogen in The End Milling of Hardened Steel," *Jurnal Cryogenic*, Vol. 15, Pp. 509-515.

Ravi, S., dan Kumar, P.M. (2012), "Experimental Investigation of Cryogenic Cooling in Milling of AISI D3 Tool Steel," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 27, Pp. 1017-1021.

Rochim, T. (2001), *Spesifikasi, Metrologi, dan Kontrol Kualitas Geometrik*, Bandung, Institut Teknologi Bandung.

Rochim, T. (1993), *Teori dan Teknologi Proses Pemesinan*, Bandung, Institut Teknologi Bandung.

Ross, P. J. (1996), *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 2nd edition, McGraw-Hill International Edition.

Sato, G. T. dan Sugiarto, N. H. (1994), *Menggambar Mesin Menurut Standar ISO*, Jakarta, PT Pradnya Paramita.

Schey, J. A. (2000), *Introduction to Manufacturing Processes*, 3rd edition, McGraw-Hill Companies, Inc.

Shammari, M.Z.A., Amwead, A.K. dan Hadi, S.A. (2012), "Effect of Cutting Parameter On Surface Roughness When Milling Hardened AISI D2 Steel (56



HRC) Using Taguchi Techniques,” *Proceedings of The ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMMECE 2012)*, Texas USA.

Shokrani, A., Dhokia, V., Newmana, T.S. dan Asraia, I.R. (2012), “An Initial Study of The Effect of Using Liquid Nitrogen Coolant on the Surface Roughness of Inconel 718 Nickel-Based Alloy in CNC Milling,” *45th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Vol. 3, Pp. 121-125.

Soejanto, I. (2009), *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.

Yildiz, Y. dan Nalbant, M. (2008),”A Review of Cryogenic Cooling in Machining Processes,”*International Journal of Machine Tools & Tools Manufacture*, Vol. 48, Pp. 947-964.

Yue, Y., Zheng, Y., Basu, S. dan Sutherland, W.J. (1998), ”Cutting Fluids: Performance Measure and Health-Related Characteristics,” Otsu Jepang.

Lampiran 1

Tabel L-1 Data Hasil Eksperimen Kekasaran Permukaan

Kombin.	SR (μm)			Rata-rata SR	SR (μm)			Rata-rata SR
	Replikasi 1				Replikasi 2			
	SR1	SR2	SR3	Replikasi 1	SR1	SR2	SR3	Replikasi 2
1	0.833	0.899	0.834	0.855	0.893	0.883	0.875	0.884
2	0.972	0.878	0.992	0.947	0.83	0.962	1.036	0.943
3	1.495	1.321	1.459	1.425	1.453	1.381	1.449	1.428
4	0.66	0.631	0.641	0.644	0.743	0.621	0.661	0.675
5	0.565	0.532	0.528	0.542	0.634	0.624	0.532	0.597
6	0.892	0.887	0.798	0.859	0.887	0.823	0.892	0.867
7	0.666	0.657	0.656	0.660	0.723	0.765	0.725	0.738
8	0.673	0.632	0.654	0.653	0.74	0.73	0.762	0.744
9	0.739	0.793	0.79	0.774	0.863	0.832	0.735	0.810
10	0.541	0.657	0.493	0.564	0.582	0.554	0.587	0.574
11	0.692	0.624	0.653	0.656	0.642	0.518	0.553	0.571
12	0.571	0.961	0.641	0.724	0.661	0.761	0.745	0.722
13	0.515	0.512	0.518	0.515	0.511	0.522	0.531	0.521
14	0.537	0.558	0.549	0.548	0.523	0.522	0.524	0.523
15	0.56	0.573	0.587	0.573	0.688	0.687	0.679	0.685
16	0.517	0.536	0.528	0.527	0.526	0.514	0.514	0.518
17	0.536	0.543	0.558	0.546	0.532	0.543	0.516	0.530
18	0.641	0.678	0.559	0.626	0.621	0.628	0.632	0.627

Lampiran 2

Tabel L-2 Data Keausan Tepi Pahat Hasil Eksperimen

No.	VB (μm)		Rata-rata VB (μm)	VB (μm)		Rata-rata VB (μm)
	Replikasi 1			Replikasi 2		
	VB1	Vbmax	Replikasi 1	VB1	VB2	Replikasi 2
1	0.013	0.030	0.021	0.010	0.034	0.022
2	0.014	0.030	0.022	0.017	0.029	0.023
3	0.013	0.039	0.026	0.017	0.027	0.022
4	0.017	0.021	0.019	0.015	0.025	0.020
5	0.017	0.023	0.020	0.017	0.024	0.021
6	0.015	0.026	0.021	0.019	0.025	0.022
7	0.017	0.019	0.018	0.013	0.021	0.017
8	0.019	0.020	0.019	0.013	0.023	0.018
9	0.013	0.021	0.017	0.018	0.024	0.021
10	0.005	0.030	0.017	0.016	0.030	0.023
11	0.015	0.017	0.016	0.012	0.025	0.018
12	0.011	0.029	0.020	0.017	0.029	0.023
13	0.015	0.022	0.018	0.015	0.023	0.019
14	0.015	0.022	0.018	0.014	0.029	0.021
15	0.017	0.023	0.020	0.018	0.021	0.020
16	0.010	0.016	0.013	0.018	0.020	0.019
17	0.010	0.018	0.014	0.015	0.021	0.018
18	0.013	0.021	0.017	0.017	0.021	0.019

Lampiran 3

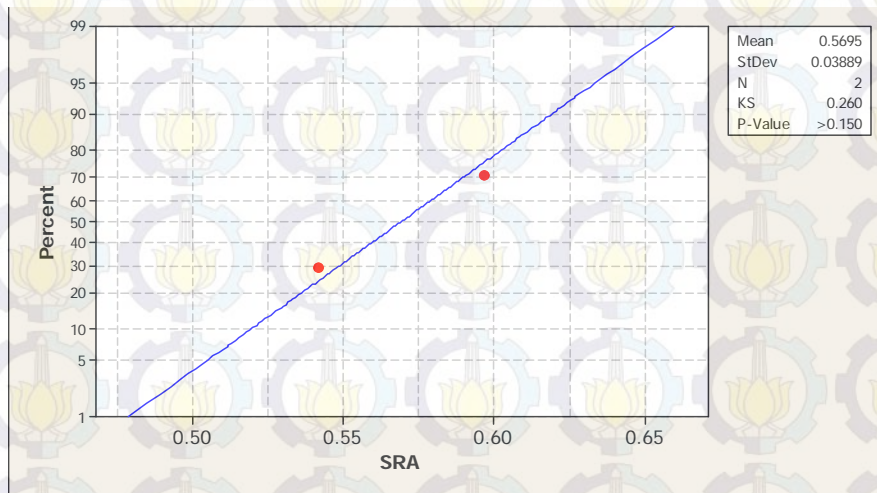
Tabel L-3 Data Laju Pengerjaan Bahan Hasil Eksperimen

No.	Waktu		Rata	LPB		Rata LPB
	(menit)		LPB			
	Replikasi 1	Replikasi 2		Replikasi 1	Replikasi 2	
1	14.08	13.73	13.90	1406.750	1442.623	1424.686
2	6.54	6.57	6.55	3028.681	3014.846	3021.763
3	4.18	4.17	4.17	4740.623	4750.100	4745.361
4	14.06	14.11	14.08	1408.751	1403.758	1406.254
5	6.90	6.86	6.88	2870.605	2885.246	2877.926
6	4.38	4.27	4.33	4518.828	4638.813	4578.821
7	7.96	7.97	7.96	2489.001	2485.096	2487.048
8	4.19	4.22	4.20	4723.658	4695.652	4709.655
9	12.08	12.23	12.15	1639.752	1619.632	1629.692
10	5.16	5.32	5.24	3834.732	3720.639	3777.685
11	14.33	13.93	14.13	1382.199	1421.903	1402.051
12	6.37	6.39	6.38	3110.762	3098.592	3104.677
13	7.13	7.05	7.09	2776.025	2807.515	2791.770
14	4.64	4.55	4.60	4265.709	4351.648	4308.679
15	13.25	13.08	13.16	1494.340	1514.340	1504.340
16	5.30	5.20	5.25	3737.024	3805.253	3771.139
17	14.15	13.98	14.06	1399.293	1416.816	1408.055
18	6.40	6.36	6.38	3093.750	3111.984	3102.867

Lampiran 4

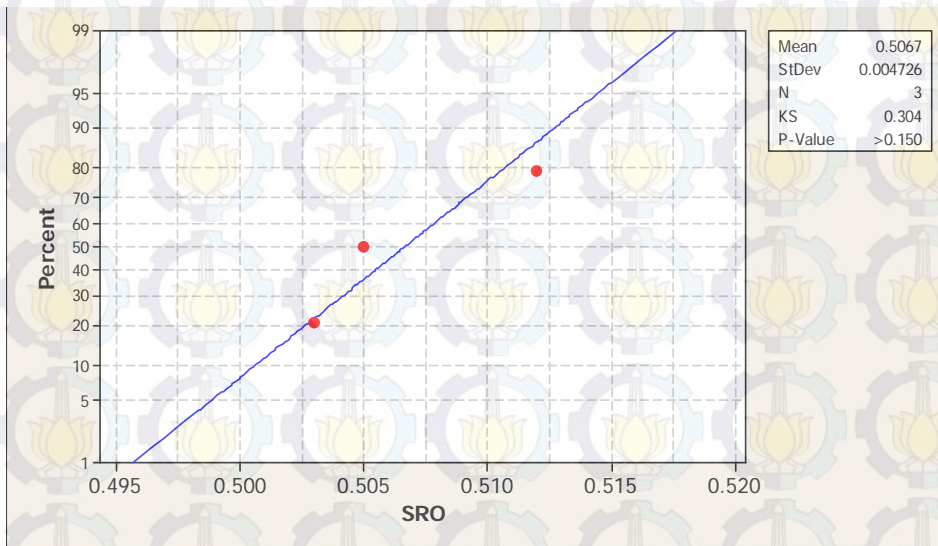
Hasil Uji Kenormalan Data Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

a. Kekasaran Permukaan (SR) Kombinasi Awal



Gambar L-4.1 Grafik uji kenormalan data untuk SR dengan menggunakan kombinasi awal

b. Kekasaran Permukaan (SR) Kombinasi Optimum

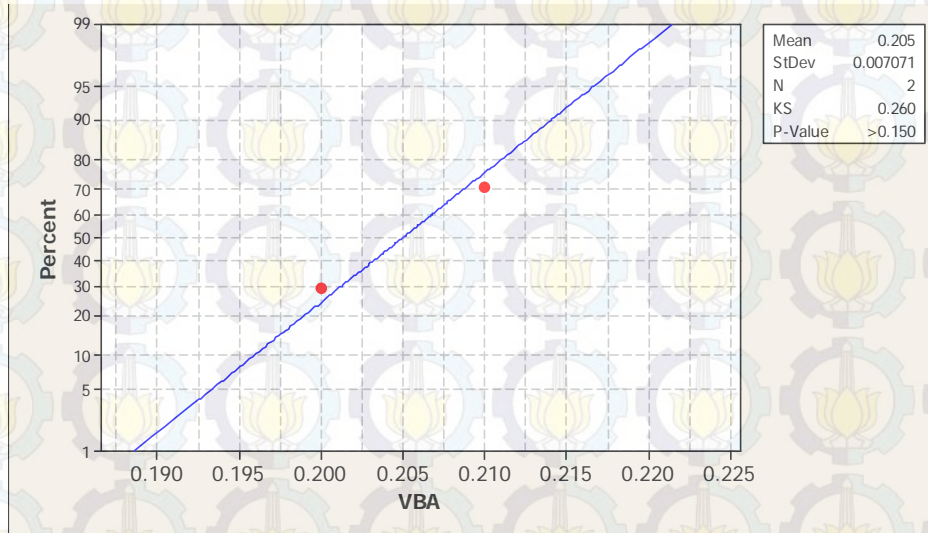


Gambar L-4.2 Grafik uji kenormalan data untuk SR dengan menggunakan kombinasi awal

Lampiran 5

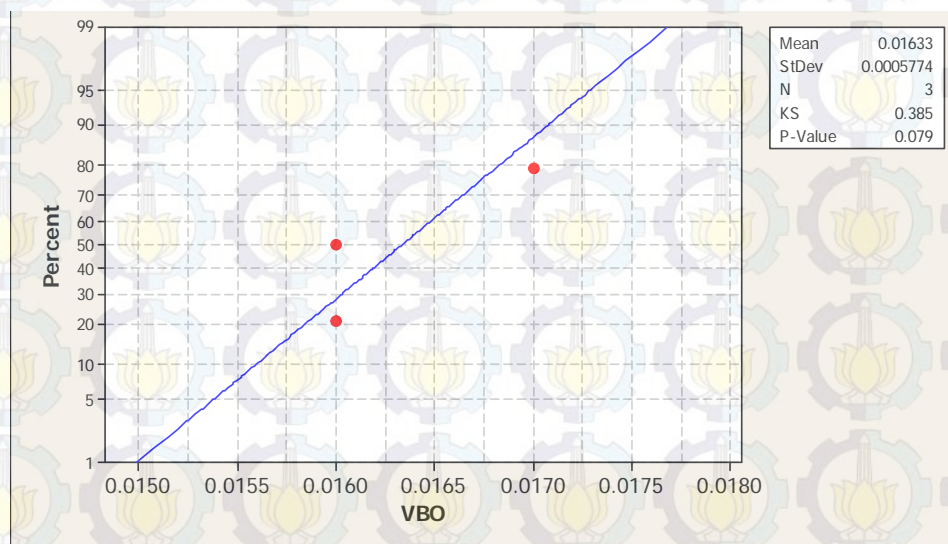
Hasil Uji Kenormalan Data Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

a. Keausan Tepi Pahat (VB) Kombinasi Awal



Gambar L-5.1 Grafik uji kenormalan data untuk VB dengan menggunakan kombinasi awal

b. Keausan Tepi Pahat (VB) Kombinasi Awal

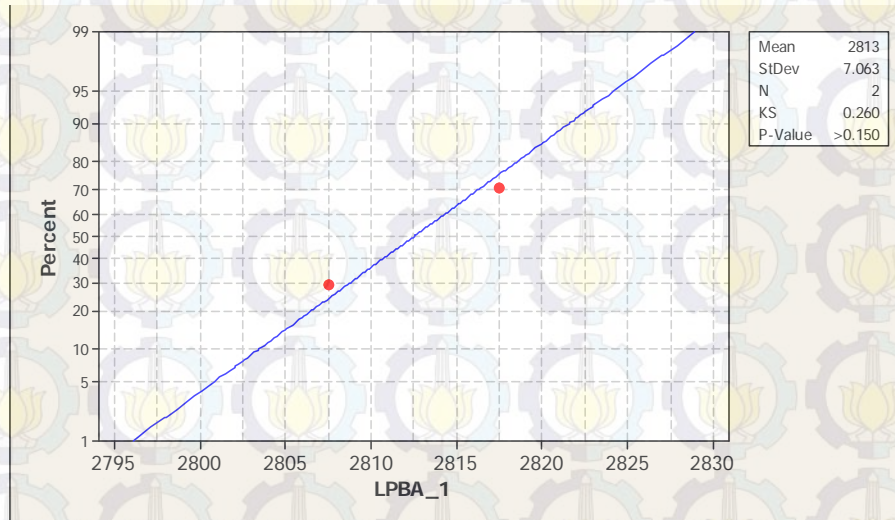


Gambar L-5.2 Grafik uji kenormalan data untuk VB dengan menggunakan kombinasi optimum

Lampiran 6

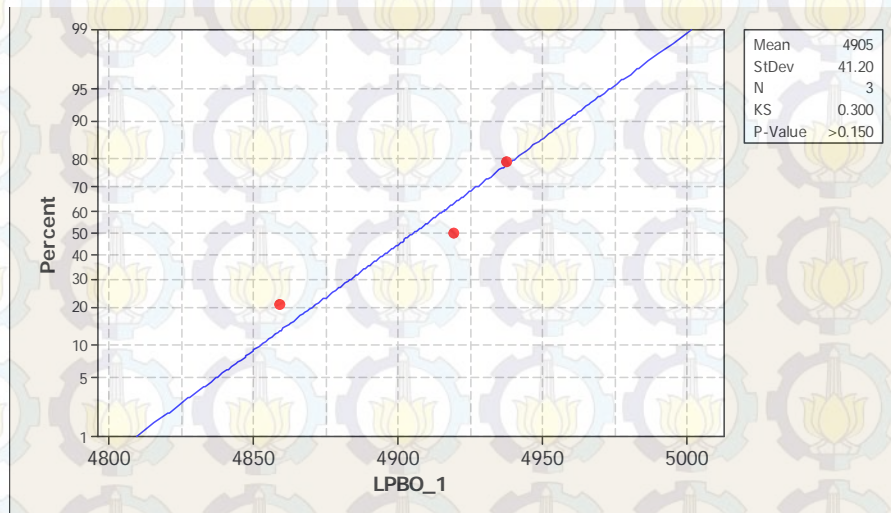
Hasil Uji Kenormalan Data Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

a. Laju Pengerjaan Bahan (LPB) Kombinasi Awal



Gambar L-6.1 Grafik uji kenormalan data untuk LPB dengan menggunakan kombinasi awal

b. Laju Pengerjaan Bahan (LPB) Kombinasi Optimum



Gambar L-6.2 Grafik uji kenormalan data untuk LPB dengan menggunakan kombinasi optimum

Lampiran 7

Hasil Uji Kenormalan Data Kekasaran Permukaan (SR) Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

Test and CI for Two Variances: SRA, SRO

Method

Null hypothesis $\text{Sigma}(\text{SRA}) / \text{Sigma}(\text{SRO}) = 1$
Alternative hypothesis $\text{Sigma}(\text{SRA}) / \text{Sigma}(\text{SRO}) \text{ not } = 1$
Significance level $\text{Alpha} = 0.05$

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
SRA	2	0.039	0.002
SRO	3	0.005	0.000

Ratio of standard deviations = 8.229
Ratio of variances = 67.724

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal	(1.326, 232.691)	(1.759, 54145.243)
Continuous	(2.380, *)	(5.666, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	1	2	67.72	0.029
Levene's Test (any continuous)	1	3	83.11	0.003

Lampiran 8

Hasil Uji Kenormalan Data Keausan Tepi Pahat (VB) Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

Test and CI for Two Variances: VBA, VBO

Method

Null hypothesis $\text{Sigma}(\text{VBA}) / \text{Sigma}(\text{VBO}) = 1$
Alternative hypothesis $\text{Sigma}(\text{VBA}) / \text{Sigma}(\text{VBO}) \text{ not } = 1$
Significance level $\text{Alpha} = 0.05$

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
VBA	2	0.007	0.000
VBO	3	0.001	0.000

Ratio of standard deviations = 12.247
Ratio of variances = 150.000

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal	(1.974, 346.302)	(3.895, 119925.000)
Continuous	(2.936, *)	(8.622, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	1	2	150.00	0.013
Levene's Test (any continuous)	1	3	117.60	0.002

Lampiran 9

Hasil Uji Kenormalan Data Laju Pengerjaan Bahan (LPB) Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

Test and CI for Two Variances: LPBA_1, LPBO_1

Method

Null hypothesis $\text{Sigma}(\text{LPBA}_1) / \text{Sigma}(\text{LPBO}_1) = 1$
Alternative hypothesis $\text{Sigma}(\text{LPBA}_1) / \text{Sigma}(\text{LPBO}_1) \text{ not} = 1$
Significance level $\text{Alpha} = 0.05$

Statistics

Variable	N	StDev	Variance
LPBA_1	2	7.063	49.880
LPBO_1	3	41.201	1697.491

Ratio of standard deviations = 0.171

Ratio of variances = 0.029

95% Confidence Intervals

Distribution of Data	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
Normal	(0.028, 4.847)	(0.001, 23.493)
Continuous	(0.050, *)	(0.003, *)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	1	2	0.03	0.241
Levene's Test (any continuous)	1	3	0.85	0.425

Lampiran 10

Hasil Uji Kesamaan Rata-Rata Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

a. Kekasaran Permukaan (SR)

Two-Sample T-Test and CI: SRA, SRO

Two-sample T for SRA vs SRO

	N	Mean	StDev	SE Mean
SRA	2	0.5695	0.0389	0.027
SRO	3	0.50667	0.00473	0.0027

Difference = μ (SRA) - μ (SRO)

Estimate for difference: 0.0628

95% lower bound for difference: 0.0139

T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 3.02 P-Value = 0.028 DF = 3

Both use Pooled StDev = 0.0228

b. Keausan Tepi Pahat (VB)

Two-Sample T-Test and CI: VBA, VBO

Two-sample T for VBA vs VBO

	N	Mean	StDev	SE Mean
VBA	2	0.20500	0.00707	0.0050
VBO	3	0.016333	0.000577	0.00033

Difference = μ (VBA) - μ (VBO)

Estimate for difference: 0.18867

95% lower bound for difference: 0.17984

T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 50.29 P-Value = 0.000 DF = 3

Both use Pooled StDev = 0.0041

c. Laju Pengerjaan Bahan (LPB)

Two-Sample T-Test and CI: LPBA_1, LPBO_1

Two-sample T for LPBA_1 vs LPBO_1

	N	Mean	StDev	SE Mean
LPBA_1	2	2812.51	7.06	5.0
LPBO_1	3	4905.3	41.2	24

Difference = μ (LPBA_1) - μ (LPBO_1)

Estimate for difference: -2092.8

95% upper bound for difference: -2020.0

T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = -67.65 P-Value = 0.000 DF = 3

Both use Pooled StDev = 33.8864

Lampiran 11

Analisis Variansi Respon Individu

a. Kekasaran Permukaan (SR)

Tabel L-11.1 ANAVA rasio S/N untuk SR

Source	DF	SS	MS	F	P	(%)
FL	1	36.241000	36.241000	36.54	0.000	40.83
Vc	2	20.672000	10.336000	10.42	0.004	21.65
Vf	2	18.083000	9.041500	9.12	0.006	18.65
Aa	2	1.412000	0.706000	0.71	0.514	0.66
Error	10	9.919000	0.991900			18.21
Total	17	86.327000				100.00

b. Keausan Tepi Pahat (VB)

Tabel L-11.2 ANAVA rasio S/N untuk VB

Source	DF	SS	MS	F	P	(%)
FL	1	3.381900	3.381900	27.42	0.000	22.88
Vc	2	6.583300	3.291650	26.68	0.000	44.50
Vf	2	2.268700	1.134350	9.20	0.005	14.20
Aa	2	0.771600	0.385800	3.13	0.088	3.69
Error	10	1.233600	0.123360			14.73
Total	17	14.239000				100.00

c. Laju Pengerjaan Bahan (LPB)

Tabel L-11.3 ANAVA rasio S/N untuk LPB

Source	DF	SS	MS	F	P	(%)
FL	1	1.050000	1.050000	3.30	0.099	0.26
Vc	2	0.265000	0.132500	0.42	0.671	0.13
Vf	2	5.178000	2.589000	8.14	0.008	1.59
Aa	2	275.599000	137.799500	433.30	0.000	96.39
Error	10	3.180000	0.318000			1.64
Total	17	285.273				100.00

BIODATA PENULIS



Dian Ridlo Pamuji, dilahirkan di kota Banyuwangi pada tanggal 07 Agustus 1982. Penulis adalah anak pertama dari pasangan Bapak Suwadak dan Ibu Sri Subingah. Pendidikan dasar ditempuh di SDN Kebaman I Srono, lulus pada tahun 1994. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan sekolah menengah pertama di SMP Negeri I Srono, lulus pada tahun 1997. Pendidikan sekolah menengah atas ditempuh di SMA Negeri I Genteng sampai pada tahun 2000. Pada tahun 2000-2004 penulis melanjutkan pendidikan D3 di Universitas Negeri Malang Jurusan Teknik Mesin. Pada tahun 2004 penulis melanjutkan studi S1 di Universitas Brawijaya Malang tepatnya di jurusan Teknik Mesin konsentrasi Teknik Produksi. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan pendidikan pascasarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada jurusan Teknik Mesin program studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur melalui beasiswa BPPN bagi dosen. Sampai saat ini, penulis adalah salah satu dosen tetap pada Politeknik Negeri Banyuwangi di jurusan Teknik Mesin. Saat ini penulis mempunyai keinginan untuk mengembangkan hasil dari tesisnya menjadi penelitian-penelitian lanjut di bidang proses manufaktur.